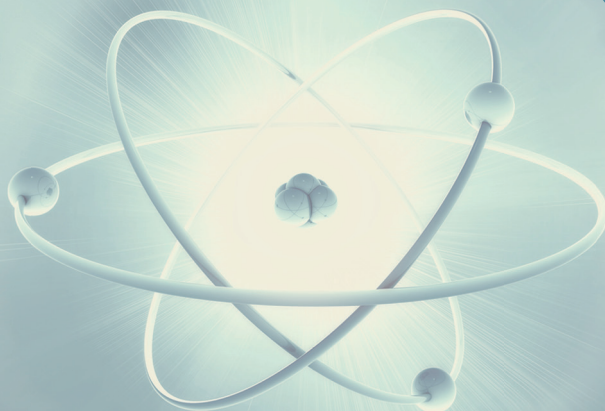
NORM Guia prático

Rócio G. dos Reis (Editor)

RÓCIO GLÓRIA DOS REIS

NORM:
GUIA PRÁTICO

1ª Edição

Rio de Janeiro
Edição do Autor
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Reis, Rócio Glória dos

NORM: guia prático / Rócio Glória dos Reis. 2016.

236 p.; 14 x 21cm.

ISBN: 978-85-922211-0-2

1. Radioecologia; 2. Poluição radioativa; Radiação; 3. Rádio-química. I. Título

CDD 570
CDU 577.277

NORM:
Guia Prático

Editor: Rócio G. dos Reis
Revisão: Eulália Érica Dutra dos Santos
Lilian de O. Bueno
Rócio G. dos Reis
Projeto Gráfico: Lilian de Oliveira Bueno
Capa: Igor Valentim / Activia Conferences & Corporate Travel
Diagramação: Anne Charlyne Raviani
Impressão: PoloPrinter

1ª edição: dezembro de 2016

Tiragem: 100 Exemplares

Gráfica PoloPrinter
11 · 3791.2965 11 · 98393.7000
www.poloprinter.com.br
polo.books
atendimento@poloprinter.com.br

Lista de autores

Bárbara Pace Mazzilli – Bacharel em Química pela Universidade de São Paulo (1975), mestre em Tecnologia Nuclear Básica pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (1978) e PhD em Radioquímica pela University of London (1982). Realizou pós-doutorado no Hauptabteilung Sicherheit Kernforschungszentrum, Karlsruhe, Germany, em 1989; no Bundesamt für Strahlenschutz, München, Germany, em 1995 e no Department of Oceanography, Florida State University, USA em 1997. Atualmente é professora e pesquisadora do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. É assessora científica de agências de fomento à pesquisa, periódicos científicos e empresas públicas e privadas. É autora de 55 artigos em revistas arbitradas com fator de impacto 12 (Web of Science). Tem experiência na área de Radioecologia e Radioproteção Ambiental, com ênfase na determinação de radionuclídeos naturais e artificiais em amostras ambientais, contaminação ambiental por "Naturally Occurring Radioactive Material" (NORM) e aplicação de traçadores radioativos naturais em estudos ambientais. Tem atuado como coordenadora de vários projetos de pesquisa multidisciplinares. Desde 2008, é a representante do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares junto à rede internacional ALMERA (Analytical Laboratories for the Measurement of Environmental Radioactivity) da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA). Desde 2015, é Membro do Standing Advisory Group on Nuclear Applications (SAGNA) da (IAEA).

Dejanira da Costa Lauria – Possui graduação em Engenharia Química, pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1979), especialização em Radioquímica, pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1981), mestrado em Química Analítica e Inorgânica, pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1986) e doutorado em Química Analítica e Inorgânica, pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1999). Completou uma especialização em gerência e administração (MBA), pela Fundação Getúlio Vargas, ênfase em Gerência de Projetos, em 2008. Foi funcionária da Comissão Nacional de Energia Nuclear por 35 anos. Tem experiência nas áreas de Avaliação de Impacto Ambiental e Remediação de Áreas Contaminadas, bem como em técnicas de Análises Radioquímicas e Radiométricas. Publicou artigos em revistas nacionais e internacionais totalizando cerca de 240 citações. Tem atuado como gerente de vários projetos multidisciplinares e organizado vários simpósios e eventos nacionais e internacionais. Foi, entre novembro de 2011 e dezembro de 2015, diretora do Instituto de Radioproteção e Dosimetria.

Flávia Luiza Soares Borges – Possui mestrado em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais, pelo Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (2013), graduação em Relações Internacionais, pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (2010) e Graduação em Tecnologia em Radiologia, pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (2010). Trabalhou na Secretaria de Estado de Saúde de Minas Gerais/Superintendência de Vigilância Sanitária - exercendo atividades na área de Proteção Radiológica - e, atualmente, é tecnologista pleno da Comissão Nacional de Energia Nuclear, onde trabalha nas atividades regulatórias e de fiscalização das instalações mínero-industriais.

Coordenação de Matérias Primas e Minerais (COMAP) - Comissão Nacional de Energia Nuclear. R. Gal. Severiano, 90,

22290-151, Botafogo, Rio de Janeiro, Brasil. Telefone: (21) 2173-2439. E-mail: flavia.borges@cnen.gov.br

Flávia Schenato - Possui graduação em Geologia, mestrado em Geociências, pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e doutorado Co-Tutela em Geociências (UFRGS) e “Matériaux et Mineraux”, pela Université de Poitiers (França). Desenvolveu atividades de pesquisa como Recém-Doutor junto ao Instituto de Geociências da UFRGS e como Professor Adjunto no Programa de Pós-Graduação em Engenharia, na Universidade Luterana do Brasil. Atualmente, exerce o cargo de Tecnologista Pleno III na Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), onde atua em atividades regulatórias na área de mineração e beneficiamento do ciclo do combustível nuclear e no licenciamento de depósitos de rejeitos radioativos. Participa em Projetos de Cooperação Técnica Internacional e em eventos suportados pela IAEA.

Comissão Nacional de Energia Nuclear – Diretoria de Radioproteção e Segurança Nuclear (DRS). Rua General Severiano, 90. Botafogo CEP: 22290-040, Rio de Janeiro – RJ Tel.: +55 (21) 2173-2632 Fax: +55 (21) 2173-2623. E-mail: fschenato@cnen.gov.br.

Luiz Ernesto Santos de Carvalho Matta – Possui doutorado em Engenharia Nuclear pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2001) e mestrado em Engenharia Nuclear pelo Instituto Militar de Engenharia (1996). Atualmente, é tecnologista sênior no Instituto de Radioproteção e Dosimetria da Comissão Nacional de Energia Nuclear. Tem experiência na área de Engenharia Nuclear, com ênfase em Radioproteção Ocupacional, atuando, principalmente, nos seguintes temas: radioproteção ocupacional, norm, radônio. Participa de missões, na América Latina, para avaliação da proteção radiológica ocupacional, por solicitação da Agência Internacional de Energia Atômica, é co-

ordenador da REPROLAM – Red de Optimización de Protección Radiológica Ocupacional en Latino América. A partir de 2012, passou a gerenciar a Gestão Tecnológica e Inovação do Instituto de Radioproteção e Dosimetria.

Nerbe Ruperti Jr. – Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais, pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e doutorado em "Thermique et Energétique" pelo Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, INSA-Lyon (França). Desenvolveu atividades de pesquisa em pós-doutorado realizado no Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, COPPE/UFRJ. Foi chefe substituto da Divisão de Rejeitos Radioativos da Diretoria de Radioproteção e Segurança Nuclear, DIREJ/DRS, da Comissão Nacional de Energia Nuclear no ano de 2002 e no período de 2007 a 2011. Atualmente, exerce o cargo de Pesquisador Titular III na Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), onde atua em atividades regulatórias na área de mineração e beneficiamento do ciclo do combustível nuclear e no licenciamento de depósitos de rejeitos radioativos. É o atual representante do Brasil no Waste Safety Standards Committee (WASSC) da AIEA.

Comissão Nacional de Energia Nuclear – Divisão de Rejeitos Radioativos (DIREJ), Diretoria de Radioproteção e Segurança Nuclear (DRS). Rua General Severiano, 90. Botafogo CEP: 22290-040, Rio de Janeiro – RJ Tel.: +55 (21) 2173-2631 Fax: +55 (21) 2173-2623. E-mail: nruperti@cnen.gov.br

Paulo Roberto Cruz – Formado em Geologia pela Universidade de São Paulo em 1965. Foi professor do Instituto de Geociências da UFPA. Geólogo da Divisão de Geologia e Mineralogia do Departamento Nacional de Produção Mineral, onde realizou vários trabalhos na área da Geologia Econômica. Ainda

no DNPM organizou, implementou e chefiou o setor de Geologia Econômica da Divisão de Fomento. Em 1971, organizou, implementou e dirigiu o Departamento de Recursos Minerais da Comissão Nacional de Energia Nuclear, atual Coordenação de Matérias-Primas e Minerais da Diretoria de Radioproteção e Segurança, onde coordena os trabalhos de geologia do setor nuclear.

Paulo Roberto Rocha Ferreira – Possui mestrado em Engenharia Nuclear, pelo Instituto Militar de Engenharia (1996). Atualmente, é tecnologista sênior no Instituto de Radioproteção e Dosimetria da Comissão Nacional de Energia Nuclear. Tem experiência na área de Engenharia Nuclear, com ênfase em Radioproteção Ocupacional, atuando principalmente, nos seguintes temas: radioproteção ocupacional, NORM, instrumentação nuclear e radônio. Participa de projetos regionais da Agência Internacional de Energia Atômica na América Latina e Caribe, bem como de missões para avaliação de radioproteção em indústrias NORM por solicitação da Agência Internacional de Energia Atômica. A partir de 2012, passou a gerenciar a Divisão de Radioproteção Ambiental e Ocupacional – DIRAD do Instituto de Radioproteção e Dosimetria atuando também a partir de 2016 como diretor substituto do Instituto de Radioproteção e Dosimetria.

Raul A. S. Villegas – É Químico Industrial e Mestre em Química, pelo Instituto de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IQ – URJF). Atualmente, trabalha no Laboratório de Poços de Caldas da Diretoria de Radioproteção e Segurança da Comissão Nacional de Energia Nuclear. Participa ativamente nas atividades regulatórias e de fiscalização de instalações mínero-industriais que contém NORM associado, bem como de instalações do ciclo do combustível nuclear. Desenvolve pesquisa em recuperação de elementos nucleares por via hidrometa-

lúrgica, visando dirimir eventuais questões regulatórias. Participa de eventos diversos relacionados ao tema NORM e possui outros treinamentos afins, incluindo participação em cursos da School of Uranium Production (DIAMO s.p. - Czech Republic) e School of Nuclear Energy Management (ICTP/IAEA).

Laboratório de Poços de Caldas – Rod. Poços de Caldas – Andradas, km 13 – Zona Rural – Poços de Caldas – MG – Brasil CEP – 37704-802 Tel. + 55 (35) 2107-3564 – E-mail: rvillegas@cnen.gov.br.

Rócio G. dos Reis – Engenheiro químico e mestre em radioecologia pelo Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD) da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Atualmente, trabalha na Divisão de Radioproteção no IRD/CNEN. Atuou na remediação de área de uma empresa em SP contaminada com resíduos e rejeitos NORM. Participou da última revisão da norma CNEN-4.01. Também tem interesse em avaliação de impacto ambiental em instalação de mineração e beneficiamento convencional associada a uma instalação nuclear. Participa de treinamentos, cursos, congressos, simpósios e periódicos, nacionais e internacionais, relacionados ao tema NORM. É aluno de doutorado com foco em avaliação ambiental estratégica e elementos terras raras.

Instituto de Radioproteção e Dosimetria – Av. Salvador Allende s/n Barra da Tijuca - Rio de Janeiro - RJ - Brasil CEP - 22783-127 – Tel. + 55 (21) 2173-2804 – E-mail: rocioreis@ hotmail.com; rocio@ird.gov.br

Vanusa Maria Delage Feliciano – Física, Mestre e Doutora na área de Aplicação de Técnicas Nucleares pela Universidade de São Paulo, tendo desenvolvido seu trabalho de Doutorado na Environmental Sciences Division Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN. Foi pesquisadora da Divisão de Radioproteção Ambiental do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

(IPEN) por 18 anos. Atualmente, trabalha no Serviço de Meio ambiente do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), atuando na área de radioproteção ambiental de indústrias nucleares e afins. Participou ativamente nas atividades regulatórias e de fiscalização de instalações mínero-industriais que contêm NORM associado. Coordenou diversos projetos de pesquisa nas áreas de reúso de resíduos NORM. Foi perita da Agência Internacional de Energia atômica, tendo ministrado vários cursos de avaliação de impacto ambiental radiológico de indústrias NORM. É professora do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais do CDTN, tendo orientado várias teses de doutorado e dissertações de mestrado nas áreas de avaliação de qualidade ambiental e estudos de radioatividade natural.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo apoio financeiro que viabilizou a edição deste livro.

Aos autores dos capítulos que se empenharam com dedicação e competência para transmitir seu saber.

Às instituições onde os autores exercem suas atividades, por permitirem que os mesmos participassem com seu tempo e energia na confecção desta obra.

A todos aqueles que de uma forma ou de outra colaboraram para que este livro se tornasse uma realidade.

ÍNDICE

1 NORM: Um Guia Prático – Introdução 15
2 Conceitos Gerais sobre Radioatividade 21
3 A Radiação Natural 41
4 Comportamento dos Radionuclídeos no Ecossistema 61
5 Principais Indústrias Geradoras de NORM 73
5A-1 Monazita 75
5A-2 Óxido de Titânio 81
5A-3 Zircônio 85
5A-4 Mineração de fosfato e produção de ácido
fosfórico 89
5A-5 Nióbio 99
5A-6 Estanho 109
5A-7 Cobre 113
5B-7 Carvão 117
5B-2 NORM na Indústria de Óleo e Gás 125
6 Aspectos Legais e Regulatórios em Empresas
Mínero-Industriais 129
7 Considerações sobre Legislação, Transporte e
Comércio Internacional de Commodities Minerais
Contendo NORM 135
8 Gerenciamento de Resíduos/Rejeitos NORM 165
9 Gerência de NORM 189

1

NORM: Um Guia Prático – Introdução

Rócio G. dos Reis

Este livro, baseado na experiência dos autores, em revisão da literatura e na avaliação dos regulamentos e guias nacionais e internacionais, tem o objetivo de auxiliar para o entendimento da necessidade de implantação das melhores práticas no gerenciamento de NORM nas indústrias que o produzem. Deve atuar como um ponto de referência, básico, amigável e útil, para auxiliar o leitor nas atividades de gerenciamento de NORM. O leitor deve ser alertado que o gerenciamento de NORM requer a consulta e o envolvimento de um número notável de partes interessadas (*stakeholders*), além da aprovação das autoridades competentes.

Este primeiro capítulo tem como função a apresentação do conteúdo deste livro, orientando o leitor na busca da informação pertinente. Assim, em cada parágrafo, temos a descrição dos assuntos tratados no capítulo. Eventualmente, pode ocorrer a repetição de uma ou outra informação em mais de um capítulo, no entanto, o contexto em que essa apresentação ocorre deve justificar essa duplicidade.

No segundo capítulo, temos uma introdução teórica, apresentando conceitos necessários ao entendimento da ra-

diação natural e seu comportamento e o capítulo tem o título "Conceitos Gerais sobre Radioatividade". Nesse texto, o leitor é apresentado à estrutura da matéria, aos principais tipos de radiação e suas características como o poder de penetração na matéria e também ao decaimento radioativo e às séries radioativas. Em seguida, temos o conceito de equilíbrio radioativo, onde também é tratado o equilíbrio secular e algumas de suas nuâncias. E finalizando o capítulo 2, é apresentada a unidade elétron-volt para a energia das radiações e um pequeno resumo com os principais conceitos apresentados nesse capítulo introdutório.

No capítulo 3 do livro, com o título de "A Radiação Natural", é introduzida a radiação cósmica, assim como a radiação cosmogênica, a radiação terrestre, o radônio e o torônio. Ao final, o autor trata da distribuição das fontes de radiação natural, onde além de desse tema, insere a distribuição percentual da contribuição relativa à exposição às radiações provenientes de fontes naturais e artificiais.

O capítulo 4 tem como título "Comportamento dos Radionuclídeos no Ecossistema". É apresentado o NORM, uma introdução ao impacto radiológico ambiental das indústrias NORM, também os mecanismos de transporte no meio ambiente, as suas propriedades e o comportamento de grupos específicos de radionuclídeos no ecossistema.

"Principais Indústrias Geradoras de NORM" é o título do capítulo seguinte e nele estão relacionadas às atividades industriais que são as mais propícias na questão NORM no mundo.

Neste capítulo, abordaremos algumas indústrias que no Brasil possuem maior probabilidade de ocorrência de NORM. Sendo que no item A do capítulo 5, temos atividades econômicas ligadas à mineração e seu beneficiamento: monazita, oxido de titânio, zircônio, mineração de fosfato e produção de ácido fosfórico, nióbio, estanho, cobre. E no item B desse capítulo, o foco está na indústria de carvão, óleo e gás.

Para o próximo capitulo, cujo título é “Aspectos Legais e Regulatórios em Empresas Mínero-Industriais”, temos a apresentação da regulamentação atinente à relação entre a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e as empresas que produzem NORM. Além do arcabouço legal, temos também comentários sobre o ponto de vista do órgão fiscalizador e licenciador na área radiológica e nuclear sobre a sua atuação nesse contexto legal.

No capítulo 7, “Considerações sobre legislação, transporte e comércio internacional de commodities minerais contendo NORM”, o objetivo é apresentar os requisitos de proteção radiológica e de transporte dos principais países importadores dos minérios brasileiros, cuja ocorrência está associada a minérios radioativos. Assim, são apresentados as referências e um panorama da formulação dos requisitos de segurança e dos guias, normas e regulamentos afetos à NORM no que tange aos limites para o público e trabalhadores, valores de isenção nas recomendações da Agência Internacional de Energia Atômica e as legislações dos principais importadores de bens minerais brasileiros: China, União Europeia e Estados Unidos.

O capítulo seguinte, “Gerenciamento de Resíduos/Rejeitos NORM”, tem como tema um aspecto importante para as indústrias geradoras de NORM, visto que na última década, as inspeções têm indicado que o principal problema enfrentado pela indústria mínero-industrial é a gestão e a deposição de NORM, muitas vezes, de forma inadequada, com consequências à proteção do público e ambientais. Neste capítulo, também temos os conceitos sobre os critérios de isenção e dispensa, assim como a apresentação da legislação pertinente. Outro tema abordado no capítulo 8 é a deposição de rejeitos de NORM, em que são apresentadas diferentes possibilidades de soluções técnicas. Finalmente, os autores discorrem sobre reutilização e reciclagem de NORM como último assunto do capítulo.

O capítulo 9, “Gerência de NORM”, apresenta conceitos e exemplos que ajudam a lidar com o problema NORM nas empresas, pois o gerenciamento da produção, deposição e liberação destas substâncias, resíduos, rejeitos e efluentes NORM nas indústrias convencionais é um desafio, uma vez que estas não estão preparadas para lidar com a questão da radioatividade e mesmo, muitas vezes, desconhecem estarem produzindo material contendo elementos radioativos em concentrações elevadas. Estas indústrias, então, passam a ter que lidar com conceitos e legislações específicas da área nuclear e ter que compatibilizá-los com conceitos e legislações aplicadas nas áreas dos poluentes convencionais. O capítulo discorre sobre os riscos associados à questão NORM. Em seguida, apresenta uma metodologia de avaliação. Também frisa a importância de estabelecer responsabilidades. E por fim, sugere um plano para gerenciar o NORM.

Neste capítulo, temos o anexo A, que trata sobre a metodologia para conhecer a atividade específica das substâncias radioativas naturais ou concentradas de uma instalação NORM. Esta metodologia permite classificar os materiais, definindo o que é isento e o que é radioativo; informação fundamental para o transporte de material radioativo e estabelecer a categoria da instalação; dentre outros usos.

No último capítulo, são apresentados aspectos práticos para proporcionar a segurança ocupacional nas empresas que possuem interações com a radiação ionizante em geral e com NORM em particular. São apresentados equipamentos para detectar, identificar e quantificar dois tipos de exposição: interna e externa. O uso adequado destes aparelhos tem como objetivo reduzir o risco de detrimento em função da radioatividade. Outros conceitos apresentados neste capítulo são as grandezas e unidades para a radiação ionizante.

Neste mesmo capítulo, temos como anexo B uma sugestão de ementa com os conceitos básicos para treinamento em proteção radiológica ocupacional.

Podemos concluir que este livro tem como capítulos iniciais um foco na introdução teórica sobre a questão NORM nas indústrias. O bloco de capítulos intermediários tem como foco o arcabouço legal, citando normas, leis e procedimentos. E o bloco final de capítulos tem uma visão mais ligada aos aspectos operacionais e práticos em relação ao NORM.

**Os autores tem em alta conta qualquer sugestão, comentário ou critica que o leitor, por gentileza, venha a fazer através do e-mail: rocioreis@hotmail.com acerca desta obra.*

Grato.

2

Conceitos Gerais sobre Radioatividade

Vanusa Maria Delage Feliciano

1.1 Estrutura da matéria

Todas as substâncias conhecidas são constituídas de átomos e moléculas. Existem substâncias simples, também conhecidas como elementos químicos, como por exemplo, ferro, oxigênio, hidrogênio, cobre, e substâncias compostas, tais como a água, o sal, entre outras.

Os átomos são constituídos de elétrons, prótons e nêutrons. Os elétrons são partículas de massa muito pequena (cerca $9,1x10^{-28}$g) dotados de carga elétrica negativa. Movem-se muito rapidamente ao redor do núcleo atômico, gerando campos eletromagnéticos. Os prótons possuem carga positiva de mesmo valor absoluto que a carga dos elétrons; assim, um próton e um elétron tendem a se atrair eletricamente. Os nêutrons, junto aos prótons, formam o núcleo atômico. Possuem carga elétrica nula e são dispostos estrategicamente no núcleo de modo a estabilizá-lo. Na Fig. 1.1, é apresentado um diagrama simplificado de um átomo e seus constituintes básicos, conforme modelo atômico descrito por Rutherford e Bohr (BOHR, 1913).

O número de prótons presentes no núcleo determina o elemento químico a que pertence o átomo. Cada átomo tem o

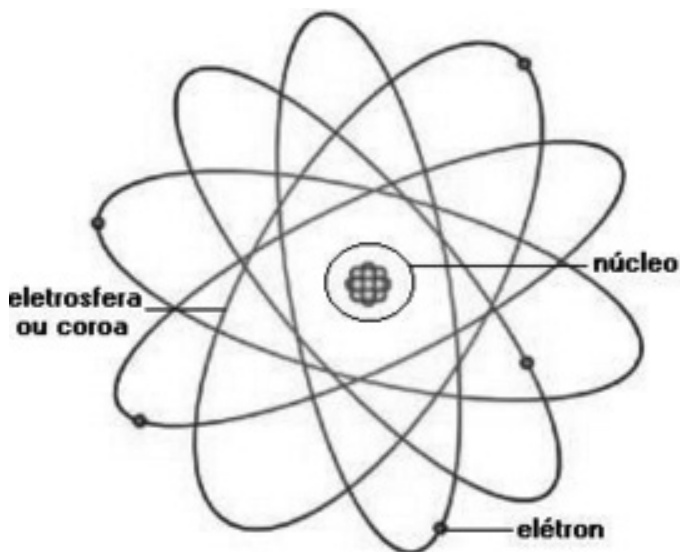



Figura 1.1 – Diagrama esquemático de um átomo e seus constituintes.

número de elétrons orbitais igual ao número de prótons. Como resultado, o átomo é neutro.

O número de elétrons presentes em um átomo e, portanto, o número de prótons presentes no núcleo é conhecido como número atômico (Z). Os prótons e nêutrons possuem massa bastante parecida, perfazendo praticamente 99,9% de toda a massa do átomo. O número total de prótons e nêutrons existentes no núcleo é conhecido como número de massa (A).

Um nuclídeo (X) consiste em uma espécie atômica caracterizada pelos seus números atômicos e de massa. Os nuclídeos simbolizam-se de acordo com o critério da União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC), de maneira genérica como ${}^{A}_{Z}X$.

Os átomos de um mesmo nuclídeo possuem sempre o mesmo número de prótons no núcleo, porém, podem ter nú-

meros diferentes de nêutrons. Estes átomos, que apresentam número diferente de nêutrons, mas com mesmo número de prótons, pertencem ao mesmo elemento químico e são chamados de “isótopos”. O hidrogênio, por exemplo, possui três isótopos, sendo eles: o hidrogênio-1 (possui apenas um próton no núcleo), o hidrogênio-2, conhecido como deutério (possui um próton e um nêutron) e o hidrogênio-3, conhecido como trítio (possui um próton e dois nêutrons). O ferro possui 10 isótopos (do ferro-52 ao ferro-61), todos com 26 prótons que caracterizam o elemento químico, sendo que o número de nêutrons varia de 26 a 35.

Na Fig. 1.2, são apresentados os três isótopos de hidrogênio.

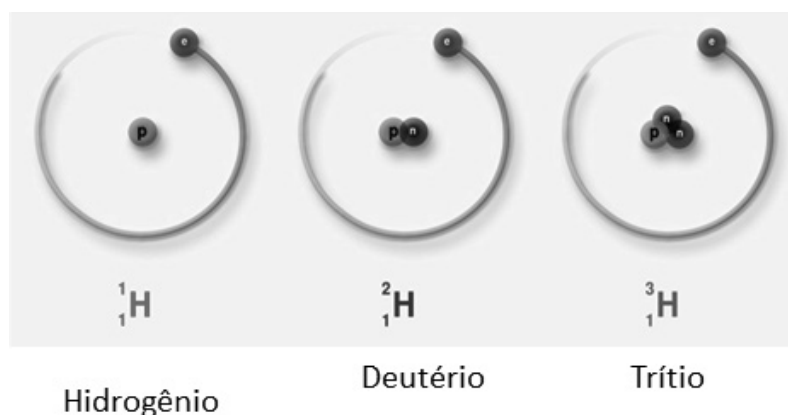



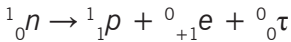
Figura. 1.2. Isótopos de hidrogênio.

1.2 Principais tipos de radiação

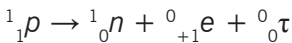
Os nuclídeos podem ser estáveis e instáveis. A condição de estabilidade é determinada, principalmente, pelo balanço entre o número de nêutrons e prótons existentes em cada nuclídeo. Conforme pode ser observado na Fig. 1.3, que apresenta

a Curva de Estabilidade Nuclear, os nuclídeos mais leves possuem praticamente o mesmo número de prótons e nêutrons. Aqueles mais pesados possuem um número de nêutrons ligeiramente superior ao de prótons.

Os nuclídeos que possuem excesso de nêutrons tendem a se transformar em elementos mais estáveis pela conversão de um nêutron (${}^{1}_{0}n$) em um próton (${}^{1}_{1}p$), processo esse conhecido como decaimento beta negativo. Este resulta na emissão de um elétron com carga negativa (${}^{0}_{-1}e$), conhecida como partícula beta negativa ${}^{1}_{+1}\beta$, e de um antineutrino (${}^{0}_{0}\tau$), conforme mostrado abaixo.

$${}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{+1}e + {}^{0}_{0}\tau$$

Desta forma, quando um átomo emite uma partícula beta negativa, ele se transforma em um novo elemento com o mesmo número de massa (porque o nêutron que havia antes foi "substituído" pelo próton), mas o seu número atômico (Z = prótons no núcleo) aumenta uma unidade.

Os nuclídeos que possuem excesso de prótons se transformam em elementos mais estáveis pela conversão de um próton (${}^{1}_{1}p$) em um nêutron (${}^{1}_{0}n$), processo esse conhecido como decaimento beta positivo. Neste caso, tem-se a emissão de um elétron com carga positiva (${}^{0}_{+1}e$), conhecida como partícula beta positiva ${}^{1}_{+1}\beta$, e de um neutrino (${}^{0}_{0}\tau$), conforme mostrado abaixo.

$${}^{1}_{1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{+1}e + {}^{0}_{0}\tau$$

Portanto, quando um átomo emite uma partícula beta positiva, ele se transforma em um novo elemento com o mesmo número de massa, mas o seu número atômico (Z) diminui uma unidade.

O neutrino e sua antipartícula, o antineutrino, são partículas subatômicas sem carga elétrica. São extremamente leves

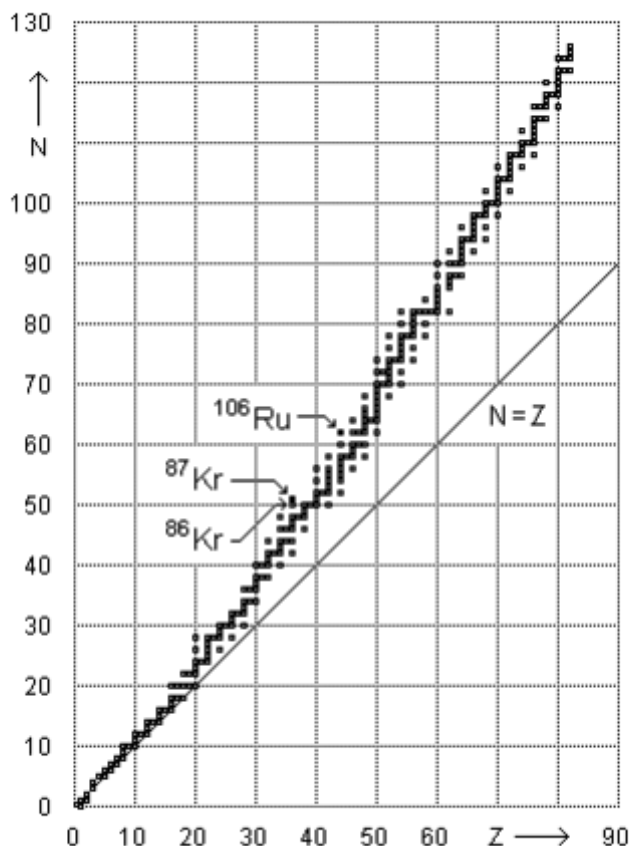



Figura 1.3. Curva de estabilidade nuclear.

(algumas centenas de vezes mais leves que o elétron). O neutrino existe com enorme abundância no Universo. De acordo com Bahcall (2005), cerca de 65 bilhões de neutrinos atravessam cada centímetro quadrado da superfície da Terra voltada para o Sol a cada segundo.

Na Fig. 1.4, são apresentados exemplos dos processos de decaimento beta.

Figura 1.5. Exemplos do processo de decaimento beta.

Alguns nuclídeos muito pesados se transformam em elementos mais leves pela emissão de uma partícula alfa (a), a qual é formada por dois prótons e dois nêutrons. Este tipo de partícula nada mais é que o núcleo de hélio, o qual possui dois prótons e dois nêutrons ($^{4}_{2}He$). Quando um átomo emite uma partícula alfa, seu núcleo fica desfalcado de 2 prótons e 2 nêutrons; portanto, o seu número de massa diminui de 4 unidades e o seu número atômico diminui de duas unidades. Este proces-

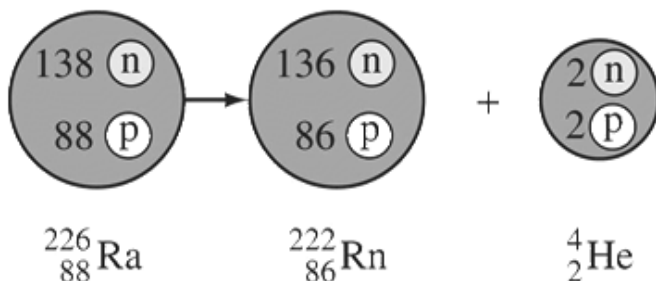



Figura. 1.6. Processo de decaimento alfa do rádio-226 em radônio-222.

so é conhecido como decaimento alfa, o qual é exemplificado na Fig. 1.6.

Geralmente, após a emissão de uma partícula alfa (α) ou beta (β), o núcleo resultante desse processo, ainda com excesso de energia, procura estabilizar-se, emitindo esse excesso em forma de onda eletromagnética, da mesma natureza da luz, denominada radiação gama ou fótons de alta energia, que nada mais são que pacotes discretos de energia sem massa e carga (DEMTRÖDER, 2010).

1.3 Poder de penetração das radiações

As diversas formas de radiação são emitidas com diferentes energias e poder de penetração e, portanto, produzem efeitos diferentes nos seres vivos, conforme mostrado na Figura 1.7.

Por exemplo, as partículas alfas com sua massa de prótons e nêutrons são barradas por uma folha de papel. No caso de irradiação de seres vivos, penetra apenas na camada superficial da pele, a qual é constituída, normalmente, de células mortas. Por esta razão, não é considerada perigosa, a menos que a substância que a esteja emitindo seja incorporada no organismo

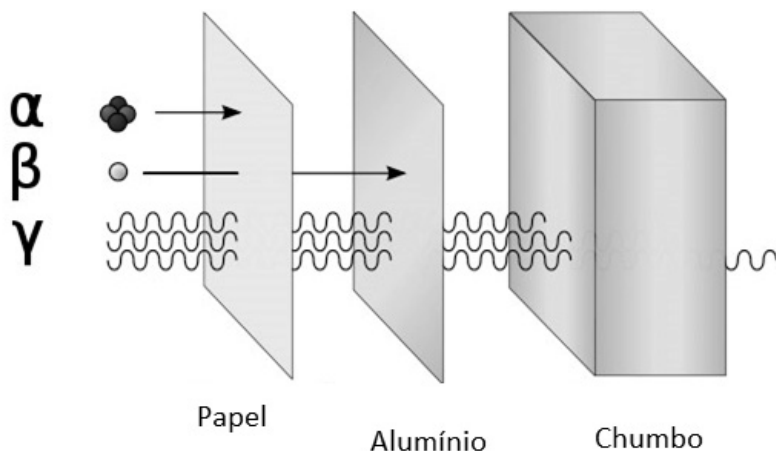



Figura 1.7. Poder de penetração das radiações em diferentes tipos de materiais.

humano através de uma ferida, por ingestão ou inalação, quando então, pode se tornar perigosa. As partículas betas são mais penetrantes, ou seja, podem penetrar desde alguns milímetros até centímetros nos tecidos vivos, conforme a sua energia. A radiação gama é ainda muito mais penetrante, podendo atravessar blocos de chumbo ou concreto.

1.4 Decaimento radioativo

O decaimento radioativo ou desintegração radioativa é a transformação, por meio da emissão de partículas alfa, beta ou de radiação gama, de núcleos com excesso de energia, conhecidos como radionuclídeos, em núcleos estáveis.

A desintegração radioativa é um processo aleatório em que núcleos instáveis de uma espécie em uma mesma amostra não sofrem desintegração ao mesmo tempo, sendo impossível prever o tempo de vida de um núcleo. Mas é possível descrever o comportamento para um número grande de átomos, uma vez

que o número de desintegrações por segundo é proporcional ao número de átomos que se transformam naquele instante. Pode-se dizer que a probabilidade de decaimento por átomo por segundo deve ser constante, independente do tempo de existência do núcleo radioativo.

O número de desintegrações nucleares por unidade de tempo é proporcional à quantidade de material radioativo na amostra (massa ou número de átomos). Simbolicamente:

$$dN/dt = -\lambda N$$

Onde N é o número de átomos radioativos, t é o tempo, e λ é a constante de decaimento, a qual dá a probabilidade de um átomo radioativo decair.

A constante de decaimento l fornece uma medida direta da instabilidade do radionuclídeo. Ela é sempre a mesma para um determinado tipo de decaimento de um radionuclídeo específico, porém, este parâmetro varia amplamente para radionuclídeos diferentes.

Integrando a equação descrita acima se obtém uma expressão de N em função do tempo.

$$\int dN/N = -\lambda \int dt$$
$$ln\ N = -\lambda t + C$$

Em um tempo t = 0, a constante de integração, C será:

$$N = N_0$$
$$ln\ N_0 = C$$

Finalmente, fazendo as substituições devidas, obtém-se a expressão:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

Conforme apresentado na Figura 1.8, os processos radioativos seguem uma lei de desintegração exponencial.

O intervalo de tempo $T_{1/2}$, durante o qual a metade dos núcleos radioativos de um tipo presentes em uma amostra decai, é chamado meia-vida.

A meia-vida ($T_{1/2}$) é dada por:

$$T_{1/2} = 0,693/\lambda$$

A vida média (t) é o tempo médio que um radionuclídeo leva para decair ou desintegrar, sendo definida por:

$$\tau = 1/\lambda$$

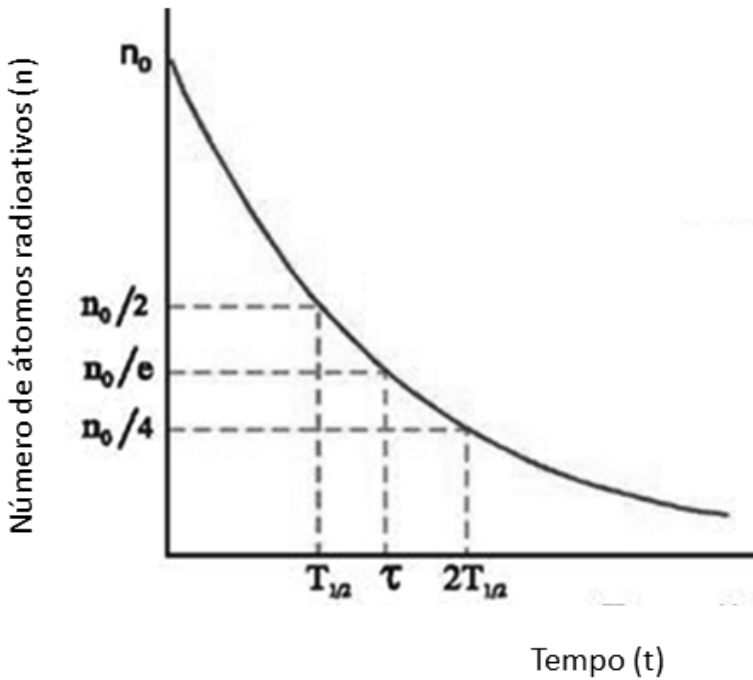



Figura 1.8. Lei do Decaimento Radioativo.

O número de desintegrações de núcleos radioativos de uma dada amostra por unidade de tempo chama-se atividade dessa amostra. A lei do decaimento radioativo é dada por:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

Esta expressão é interessante, porque mostra que o número de desintegrações de um tipo de núcleo radioativo por unidade de tempo é proporcional ao número de tais núcleos presentes. Assim, a atividade associada a um tipo de núcleo em uma dada amostra diminui na mesma proporção e com a mesma meia vida do número de tais núcleos presentes.

A atividade de uma amostra com átomos radioativos (ou fonte radioativa) é medida em: Bq (Becquerel) = uma desintegração por segundo.

Outra grandeza importante quando se deseja estudar o comportamento ambiental de um radionuclídeo, assim como seus efeitos biológicos, é a atividade específica, definida como a razão entre a atividade e a massa de material que dá origem a essa radioatividade. A taxa instantânea de desintegrações nucleares é definida como o produto da constante de decaimento pelo número de átomos. Usando-se a notação A, ao invés de *dN/dt*, pode-se escrever:

$$A^* = \lambda N$$

Onde a unidade de A* é igual ao número de desintegrações por unidade de tempo. A atividade é, portanto, proporcional ao número de átomos radioativos. O número de átomos radioativos N em uma amostra de um radionuclídeo específico é dado por:

$$N = mN_A/A$$

Onde m é a massa da substância em gramas, N_A é o número de Avogadro ($6{,}025 \times 10^{23}$ átomos/mol) e A é o peso atômico do radionuclídeo em gramas/mol.

Fazendo-se as substituições necessárias, obtém-se:

$$A^* = 0{,}693 m N_A / T_{1/2} A$$

$$A^*/m = 0{,}693 N_A / T_{1/2} A$$

Onde A*/M é a atividade específica do radionuclídeo em questão. Esta expressão mostra que radionuclídeos com peso atômico elevado e meia-vida longa apresentam uma atividade específica baixa.

Por exemplo, o Th_{nat} é formado por 100% de ^{232}Th. A sua meia-vida é igual a $1{,}4 \times 10^{10}$ anos, o seu peso atômico é igual a 232,08 g por mol. Portanto, atividade de 1 grama de Th_{nat} é igual a:

A*= (0,693)*(1 g)*($6{,}025 \times 10^{23}$átomos/mol)/($1{,}4 \times 10^{10}$ anos)*($5{,}26 \times 10^{5}$ min/ano)*(232,08 g/mol)

A*= 244105,87 desintegrações por minuto ou 4.068,4 desintegrações por segundo

Portanto, 1 grama de tório contém 4068,4 Bq, aproximadamente, lembrando que 1 Bq é igual a 1 desintegração por segundo.

1.5 Séries radioativas

Na natureza, existem elementos radioativos que realizam transmutações ou “desintegrações” sucessivas, até que o núcleo atinja uma configuração estável. Isso significa que, após um decaimento radioativo, o núcleo não possui, ainda, uma organi-

zação interna estável e, assim, ele executa outra transmutação para melhorá-la e, ainda não conseguindo, prossegue, até atingir a configuração de equilíbrio.

Em cada decaimento, os núcleos emitem radiações dos tipos alfa, beta e/ou gama e cada um deles é mais "organizado" que o núcleo anterior. Essas sequências de núcleos são denominadas séries radioativas ou famílias radioativas naturais.

No estudo da radioatividade, constatou-se que existem apenas 3 séries ou famílias radioativas naturais, conhecidas como Série do Urânio (^{238}U), Série do Actínio (^{235}U) e Série do Tório (^{232}Th). Nas Fig. 1.9 a 1.11, são mostradas as séries radioativas do urânio, actínio e do tório, respectivamente.

Os elementos de cada série estão em equilíbrio radioativo, ou seja, em equilíbrio secular. Isso quer dizer, que à medida que um elemento se desintegra, formando outro, esse segundo elemento também tem sua quantidade diminuída pela sua própria desintegração, resultando em uma que seja igual à quantidade de isótopos naturais por um longo tempo.

1.6 Equilíbrio radioativo

Na Fig. 1.12, tem-se um exemplo do decaimento de uma série radioativa, onde o nuclídeo "pai" (^{211}Pb) decai para um nuclídeo "filho" (^{211}Bi), o qual decai para um nuclídeo "neto" (^{207}Tl), que decai para o nuclídeo "bisneto" (^{207}Pb) sendo esse, um elemento estável.

O número de átomos radioativos de cada elemento da série será dado por:

- Nuclídeo 1 (^{211}Pb): $dN_1/dt = -\lambda_1 N_1$
- Nuclídeo 2 (^{211}Bi): $dN_2/dt = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$
- Nuclídeo 3 (^{207}Tl): $dN_3/dt = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3$
- Nuclídeo 4 (^{207}Pb): $\lambda_4 N_4$

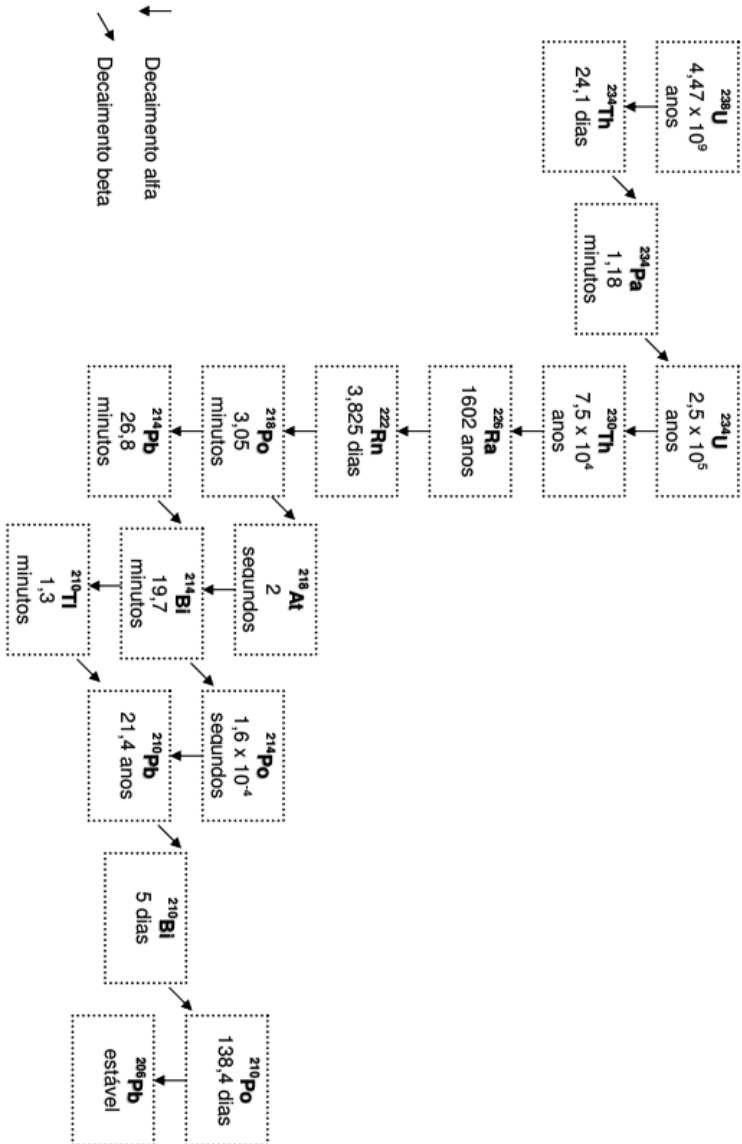



Figura 1.9. Série radioativa natural do ^{238}U.

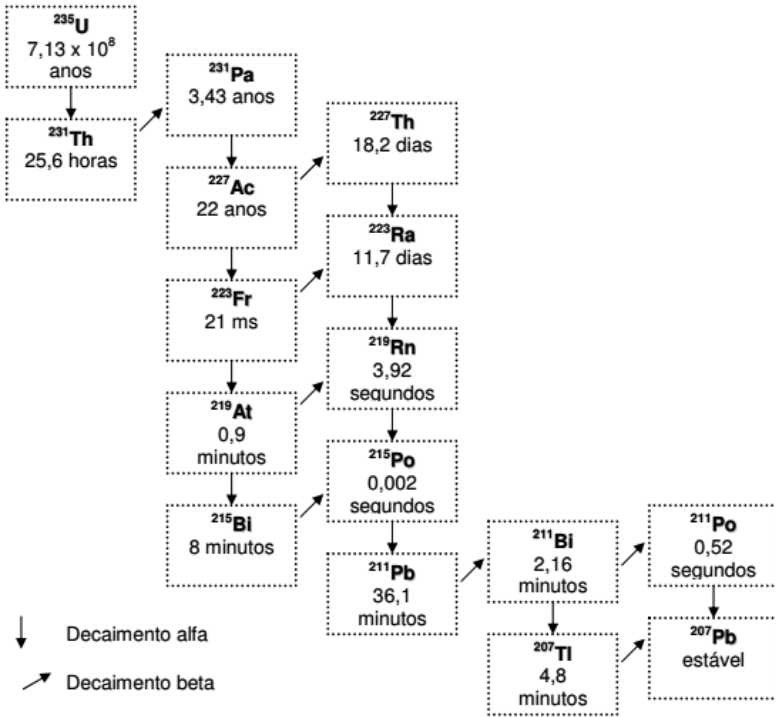



Figura 1.10. Série radioativa natural do ^{235}U.

O termo equilíbrio radioativo é usado para expressar a condição em que:

$$df(t)/dt = 0$$

Aplicando-se esta condição aos membros de uma cadeia radioativa como:

$$dN_1/dt = -\lambda_1 N_1$$
$$dN_2/dt = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$
$$dN_3/dt = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3$$

^{232}Th
1,4 x 10^{10} anos

^{228}Ra
5,8 anos

^{228}Ac
6,13 horas

^{228}Th
1,90 anos

^{224}Ra
3,64 dias

^{220}Rn
54,5 segundos

^{216}Po
0,158 segundos

^{212}Pb
10,6 horas

^{212}Bi
60,5 minutos

^{212}Po
3,0 x 10^{-7} segundos

^{208}Tl
3,1 minutos

^{208}Pb
estável

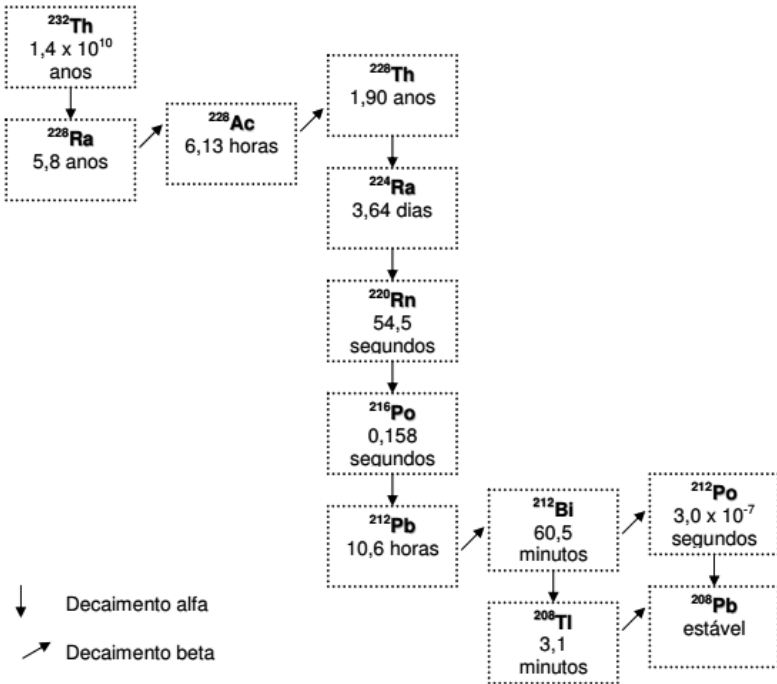
↓ Decaimento alfa

↗ Decaimento beta

Figura 1.11. Série radioativa natural do ^{232}Th.

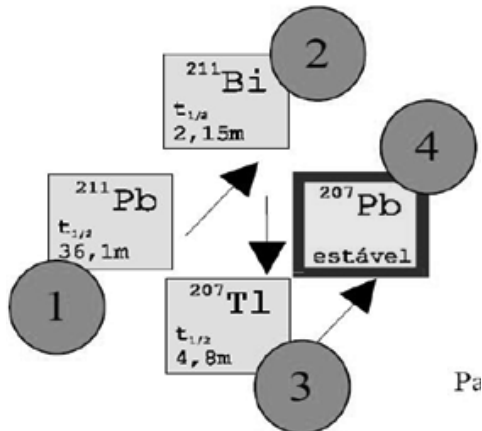



Figura 1.12. Decaimento radioativo em série.

...

$$dN_n/dt = \lambda_{n-1}N_{n-1} - \lambda_n N_n$$

As derivadas dN_1/dt .... dN_n/dt ficam todas iguais a zero, significando que o número de átomos na cadeia não está mudando.

Esta condição não pode ser satisfeita para a substância pai:

$$dN_1/dt = -\lambda_1 N_1 = 0$$

onde $\lambda_1 = 0$, o que é uma contradição em se tratando de material radioativo.

Mas é possível atingir-se um estado muito próximo ao equilíbrio desde que a substância pai possua l muito pequeno (~ zero), ou seja, uma meia-vida longa.

Essa condição é satisfeita pelas cadeias radioativas que ocorrem na natureza e este equilíbrio é chamado de equilíbrio secular. Neste caso, as quantidades de cada componente permanecerão constantes no tempo e o decaimento do núcleo pai é ainda praticamente desprezível, quando este equilíbrio for alcançado.

Nessas condições, pode-se escrever que:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = ... = \lambda_n N_n$$

ou

$$\lambda_2 N_2/\lambda_1 N_1 = \lambda_2/(\lambda_2 - \lambda_1) \cong 1$$

Em termos de meia-vida:

$$N_1/(T_{½})_1 = N_1/(T_{½})_1 = ... = N_n/(T_{½})_n$$

Na Fig.1.13, é mostrada a condição de equilíbrio secular de duas substâncias. Conforme pode ser observado nesta condição, o radionuclídeo filho apresenta a mesma taxa de decaimento do pai.

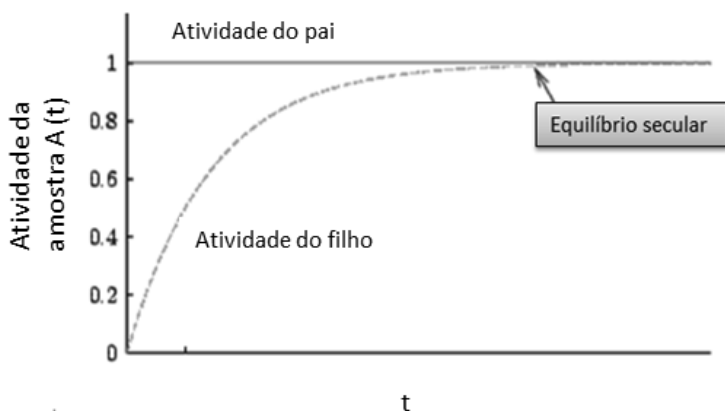



Figura 1.13. Condição de equilíbrio secular.

Estas relações podem ser aplicadas sempre que diversos produtos de vida curta surgem a partir de decaimentos sucessivos, começando por um pai de meia-vida relativamente longa.

A maioria dos sistemas geológicos está em equilíbrio radioativo secular, ou seja, as atividades (número de desintegrações por unidade de tempo) são constantes para todos os radionuclídeos de cada série envolvida.

Devido às diferenças nas propriedades químicas e nucleares (meia-vida, energia de recuo, etc) dos elementos pertencentes às séries radioativas naturais, este podem ser separados durante processos superficiais, tais como intemperismo, transporte e deposição, rompendo-se o estado de equilíbrio. Materiais geológicos podem apresentar-se em desequilíbrio devido à entrada ou saída destes elementos do sistema. Se o sistema

retornar à condição de fechado, o equilíbrio tende a ser restabelecido pelo acúmulo dos produtos de decaimento da série, ou pelo decaimento de um nuclídeo que não tenha sido produzido pelo decaimento de um nuclídeo pertencente ao sistema.

Em condições geológicas de superfície (ou próxima a ela), um sistema químico fechado pode não existir. Neste caso, os processos causados por alterações climáticas podem provocar a introdução ou a remoção de material e, considerando que os decaimentos ocorrem em diferentes fases, com diferentes propriedades físicas e químicas, é provável que, sob estas condições climáticas, ocorra a dispersão de alguns elementos da cadeia. Isso provoca o desequilíbrio das séries de decaimento, ou seja, os produtos intermediários e finais não estarão presentes em qualquer ponto na proporção esperada. Sob estas condições, a medida da abundância de um produto de decaimento não necessariamente fornece a abundância do pai. Entretanto, o grau de desequilíbrio vai variar segundo diversos fatores, como a mineralogia dos radioelementos e de suas vizinhanças, como a presença de sulfatos e carbonatos. O clima, a topografia local, a hidrologia também podem influir nesse equilíbrio.

O grau de desequilíbrio não é facilmente estabelecido com medidas de campo diretas, apesar de, na maioria das vezes, poder ser determinado em laboratório de várias maneiras, comparando os resulatados de análises radioquímicas com as estimativas fundamentadas no processo de desintegração ou medindo a radioatividade dos diferentes produtos de decaimento (VASCONCELOS, 2010).

1.7 Energia das radiações

A energia dos vários tipos de radiação, sejam elas partículas alfa e beta ou raios gama é, usualmente, expressa em termos de elétron-volt (eV), a qual corresponde à energia cinética adquirida por um elétron ao ser acelerado por uma diferença de

potencial igual a um volt (V). A relação entre Joule (J) e elétron-volt (eV) é dada por:

$$1eV = 1.602 \cdot 10^{-9}J$$

Normalmente, são empregados múltiplos do elétron-volt, tais como o quiloelétron-volt = 1keV = 1000 eV e o megaelétron-volt = 1 MeV = 1.000.000 eV.

A seguir o resumo dos principais conceitos apresentados neste Capítulo:

- Radionuclídeos: são nuclídeos instáveis.
- Radioatividade: transformação de um elemento em outro pela emissão de radiação.
- Tipos de radiação: partículas alfa e beta, raios gama, nêutrons, etc.
- Atividade: taxa de decaimento de um determinado radionuclídeo
- Meia-vida: intervalo de tempo necessário para que a atividade de um determinado radionuclídeo caia à metade.

Referências Bibliográficas

BAHCALL, J.N. Solar models and solar neutrinos: current status. *Physica Script,* v. T121, pp.46–50, 2005.

BOHR, N. (1913). On the constitution of atoms and molecules, Part I. *Philosophical Magazine,* v.2, n.15, pp.1–24, 2013.

DEMTRÖDER, W. ***Atoms, molecules and photons - graduate texts in physics***. 2nd Ed. London: Springer, 2010. 581p.

VASCONCELOS, D.C. *Estudo da radioatividade natural em areias de praias do extremo sul da Bahia utilizando métodos de análises nucleares*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2010. 124p.

3

A Radiação Natural

Vanusa Maria Delage Feliciano

Materiais radioativos de ocorrência natural são e sempre foram parte do nosso mundo. Tanto o planeta quanto a atmosfera terrestre contêm diferentes espécies radioativas naturais. Desde o seu aparecimento na Terra, o homem encontra-se exposto à radiação proveniente de fontes extraterrestres e dos radionuclídeos presentes na crosta terrestre. Entretanto, somente nos últimos trinta anos, dado o uso crescente da radioatividade em suas múltiplas aplicações, cresceu o interesse pela determinação da exposição às radiações, às quais o homem pode estar sujeito. Essas radiações têm origem na natureza (fontes naturais) ou em atividades do próprio homem (fontes artificiais).

As fontes naturais podem ser agrupadas em três tipos, de acordo com sua origem:

- cósmica (de origem extraterrestre);
- cosmogênica (proveniente da interação da radiação cósmica com os átomos presentes na atmosfera); e
- radiação natural de origem terrestre, proveniente dos radionuclídeos naturais existentes na crosta da Terra.

1.1. Radiação cósmica

Os raios cósmicos são partículas energéticas vindas do espaço interestelar que se deslocam a velocidades próximas à da luz e atravessam a atmosfera terrestre. Eles são classificados em três grupos: pouco energéticos, de energia moderada e ultra-energéticos. Os raios cósmicos de mais alta energia são 100 milhões de vezes mais energéticos do que qualquer partícula produzida pelo mais poderoso acelerador da Terra. Esse fenômeno é raro – seu fluxo é de cerca de uma partícula por km^2 por século, e sua origem ainda era desconhecida. Raios cósmicos de baixa energia são abundantes e vêm de todas as direções do céu, a grande maioria da nossa galáxia (FERNANDES, 2016).

Pesquisas recentes demonstraram que os raios cósmicos vêm de fontes localizadas em galáxias próximas à nossa, dotadas de núcleos ativos alimentados por buracos negros gigantes que engolem grandes quantidades de matéria ao seu redor e cospem partículas e energia (FERNANDES, 2016).

A radiação cósmica também é produto da atividade solar, sendo dependente dela. O Sol possui um ciclo de atividade conhecido, com um período de 11 anos, dentro do qual ocorre a inversão da polaridade magnética, sendo que, a cada mudança de polaridade, o Sol passa por um ciclo de máximo e mínimo em sua atividade. Quando ocorrem grandes explosões solares, com duração de horas ou dias, as partículas emitidas podem chegar à Terra e podem contribuir para o aumento significativo da exposição decorrente da radiação cósmica (FEDERICO, 2011).

A radiação cósmica é constituída, predominantemente, de núcleos (cerca de 98% no total), sendo que desses, 87% consistem de hidrogênio, 12 % de hélio e 1 % de núcleos pesados, com pequena contribuição de elétrons e pósitrons (cerca de 2 %) (BARTLETT, 2004).

Todas essas radiações não possuem direção definida e perdem energia, principalmente, por ionização ao atravessarem o meio material, bem como sofrem deflexão pelo campo magnético terrestre. Ao colidirem com núcleos de átomos da atmosfera terrestre, por meio de reações de espalação, os raios cósmicos produzem chuveiros de partículas secundárias, tais como nêutrons, mésons, múons, elétrons, neutrinos, pósitrons, além de raios gama (DORMAN, 2004).

A exposição advinda da radiação cósmica nas proximidades da Terra sofre um aumento considerável em função da altitude, fazendo com que tripulações de aeronaves possam ultrapassar com frequência o limite de dose anual proposto por organismos internacionais para indivíduos do público, que é de 1 mSv[1] (FEDERICO, 2011). As pessoas que vivem em La Paz, Bolívia, por exemplo, a 3.650m acima do nível do mar, são muito mais expostas à radiação cósmica do que os moradores de Amsterdã, na Holanda, que é ao nível do mar.

Segundo a NASA, os níveis de radiação decorrentes da radiação cósmica, os quais os astronautas estariam expostos durante uma viagem de ida e volta a Marte, ficariam acima dos limites estabelecidos pelas normas de proteção radiológica. O instrumento RAD (*Radiation Assessment Detector)* mostrou que o robô Curiosity ficou exposto a uma média de 1,84 mSv por dia. Um dado importante revelado pelo experimento foi que apenas 5% da radiação detectada teve origem no Sol, já que as medidas foram realizadas em um período de baixa atividade solar, ou seja, dependendo do período da viagem, a dose poderá ser ainda maior. As estimativas da exposição dos astronautas à radiação não incluem a permanência em Marte (ZEITLIN et al., 2013).

Na Fig. 1.1, tem-se uma comparação da dose efetiva para vários tipos de situações de exposição do homem à radiação,

---

1 (*) mSV: é uma unidade usada para medir o impacto da radiação sob o corpo humano.

incluindo o cálculo de uma viagem a Marte. Deve ser salientado que o eixo vertical é logarítmico e, portanto, cada valor é dez vezes superior ao anterior.

Na Fig. 1.2, são mostrados os níveis de dose de radiação cósmica em função da altitude acima do nível do mar.

Outro fator que pode influenciar a exposição à radiação cósmica é a latitude. O campo magnético atua defletindo parte das partículas carregadas incidentes, assim, a magnetosfera terrestre afasta essas radiações da região equatorial da Terra, havendo uma intensidade maior de raios cósmicos na região dos polos do que no Equador (LEWIS et al., 2005).

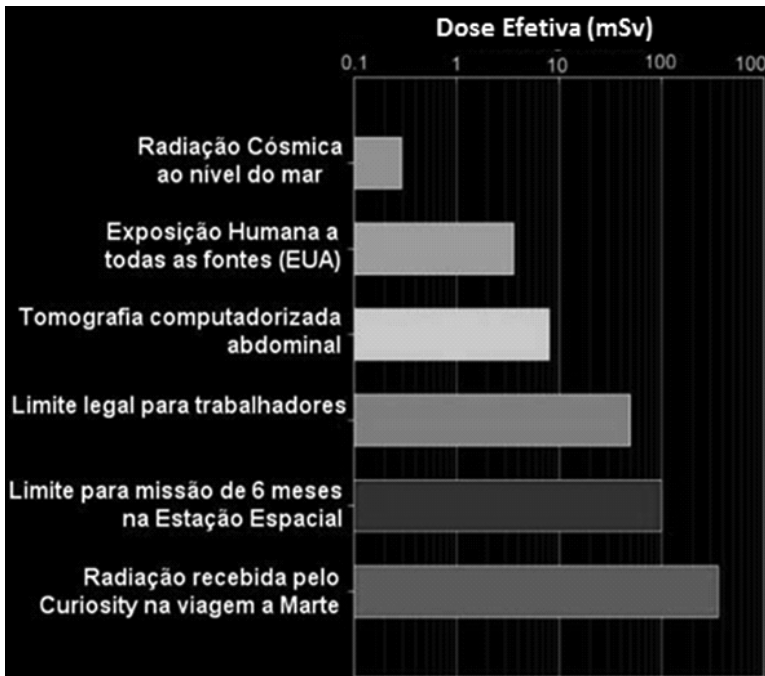



Fig.1.1. Comparação da dose efetiva para vários tipos de situações, incluindo o cálculo de uma viagem a Marte

Fonte: adaptado de NASA, 2016).

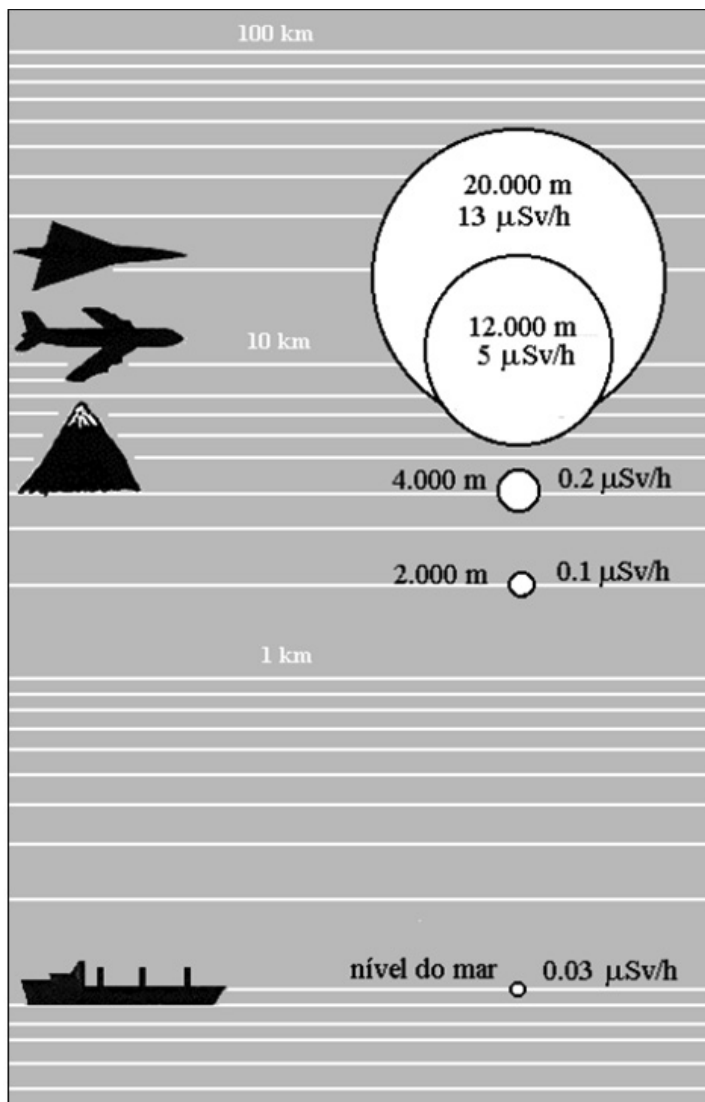



Fig. 1.2. Variação dos níveis de dose de radiação cósmica em função da altitude

(Fonte: MAZZILLI et al, 2016).

Na Fig. 1.3, tem-se a uma representação de como o campo magnético terrestre atua sobre os raios cósmicos emitidos pelo Sol.

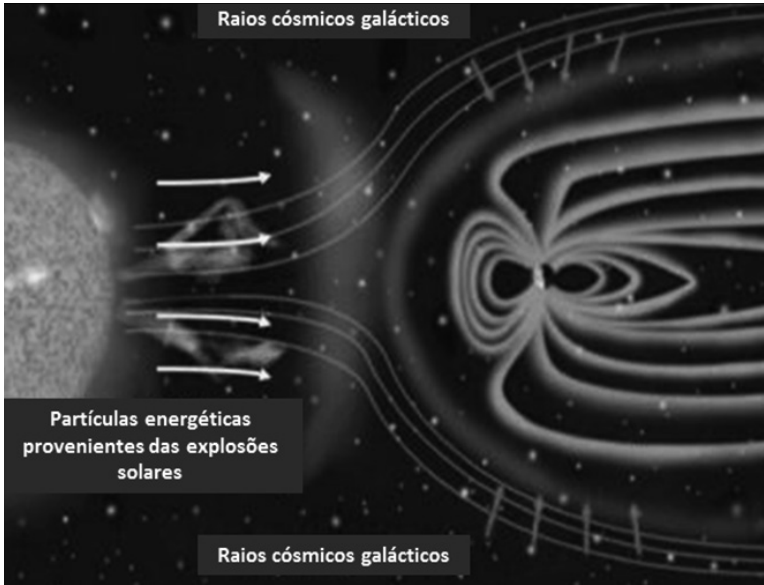



Fig. 1.3. Representação artística de como o campo magnético terrestre atua sobre os raios cósmicos emitidos pelo Sol

(Fonte: NASA, 2016).

1.2. Radiação cosmogênica

A radiação cosmogênica aparece como resultado da interação dos raios cósmicos com átomos e moléculas da atmosfera. Como resultado, são formados radionuclídeos cosmogênicos, os quais são tipicamente elementos químicos de número atômico baixo com meia-vida, variando de dias até 2,5 milhões de anos. Sua produção tem-se mantido constante pelos últimos 1000 anos, mas varia consideravelmente com a latitude e é

significativamente maior em elevadas altitudes (AQUINO&AQUINO, 2016).

Os radionuclídeos cosmogênicos são formados por meio de reações de espalação, um processo no qual ocorrem interações de altas energias na ordem de 50 MeV, embora para algumas reações o limiar seja em torno de centenas de MeV. Além disso, alguns deles são formados por reações de captura de nêutrons térmicos.

Na Tab. 1.1, são apresentados os principais radionuclídeos formados, bem como os mecanismos de formação.

Tab. 1.1. Principais radionuclídeos cosmogênicos e seus mecanismos de formação.

Radionuclídeo	Mecanismo de formação
^{3}H (trítio)	^{14}N (n,^{12}C)^{3}H
^{7}Be, ^{10}Be, ^{11}C	Espalação nuclear dos átomos de N and O
^{14}C	^{14}N (n,p)^{14}C
^{18}F	^{18}O (p, n)^{18}F e espalação nuclear dos átomos de Ar
^{22}Na, ^{24}Na, ^{28}Mg, ^{26}Al, ^{31}Si, ^{32}Si, ^{32}P, ^{34m}Cl, ^{35}S, ^{38}Cl	Espalação com átomos de Ar
^{36}Cl	^{35}Cl (n, γ)^{36}Cl
^{37}Ar	^{37}Cl (p, n)^{37}Ar
^{39}Ar	^{38}Ar (n, γ)^{39}Ar
^{39}Cl	^{40}Ar (n, np)^{39}Cl e espalação nuclear dos átomos de Ar
^{41}Ar	^{40}Ar (n, γ)^{41}Ar
^{81}Kr	^{80}Kr (n, γ)^{81}Kr

(FONTE: UNSCEAR, 2008)

Dois radionuclídeos cosmogênicos são de particular importância do ponto de vista biológico: o ^{3}H, um isótopo radioativo do hidrogênio e o ^{14}C.

O ^{3}H, que tem um tempo de meia-vida de 12,3 anos, é produzido em grande quantidade pelos processos cosmogênicos, sendo rapidamente oxidado ou trocado com o hidrogênio na atmosfera para formar água tritiada (HTO), que cai na terra pela precipitação. Por ser um isótopo do hidrogênio, encontra-se em todos os organismos vivos. O ^{14}C é um radioisótopo do carbono com meia-vida de 5760 anos. Após a sua produção na atmosfera, o ^{14}C é oxidado, formando o monóxido de carbono-14 (^{14}CO), o qual se transforma em dióxido de carbono-14 ($^{14}CO_2$), em um intervalo que leva dias ou até semanas (AQUINO&AQUINO, 2016).

Os radionuclídeos cosmogênicos contribuem pouco para a exposição do homem à radiação natural, sendo utilizados, principalmente, como traçadores nos sistemas hidrológicos e atmosféricos, bem como em estudos de datação de fósseis e rochas.

1.3. Radiação terrestre

A radiação terrestre pode ser encontrada em diferentes compartimentos do ecossistema, dependendo da concentração da atividade presente nas rochas, solos, água, alimentos e mesmo no corpo humano. As fontes de radiação terrestre mais importantes são o ^{40}K, o ^{87}Rb e as duas séries de elementos radioativos, que têm sua origem no decaimento do ^{238}U e ^{232}Th, as quais contribuem com cerca de 70% da dose anual por pessoa, devido à exposição à radiação natural. Outros radionuclídeos da série de decaimento do ^{235}U têm pouca influência na exposição à radiação. Esses radionuclídeos são chamados de primordiais e foram originados durante o processo de formação do Universo. No entanto, nos bilhões de anos em que a Terra existe, os radionuclídeos de meia-vida curta desapareceram. Os radionuclídeos

que até hoje se mantêm são aqueles cuja meia-vida é comparável à idade da Terra (MAZZILLI et al., 2016).

Várias são as fontes de radiação terrestre que podem contribuir para a exposição interna do homem em decorrência da inalação ou ingestão de radionuclídeos primordiais presentes nos solos, água, alimentos, bem como para a exposição externa, uma vez que muitos desses radionuclídeos são emissores gama. Entre essas fontes podem ser citadas a queima de carvão, a lavra e o beneficiamento de minérios, a utilização de materiais de construção, o uso de fertilizantes fosfatados, a exploração de petróleo e gás natural, a siderurgia, entre outras.

Aproximadamente, 95% da população mundial vivem em áreas onde a dose média oscila entre 0,3 e 0,6 mSv/ano. Aproximadamente, 3% da população recebem doses da ordem de 1 mSv/ano e 1,5% acima de 1,4 mSv/ano, existindo lugares em que os níveis de radiação terrestre são muito mais elevados. Nas proximidades da cidade de Poços de Caldas, Minas Gerais, existe uma colina chamada Morro do Ferro, onde os níveis de radiação atingem valores da ordem de 250 mSv/ano. Este lugar não é habitado. Na cidade de Guarapari, entretanto, onde vivem cerca de 12.000 habitantes, podendo receber até 30.000 visitantes durante as férias de verão, são encontrados níveis da ordem de 175 mSv/ano, em algumas praias, cujas areias são ricas em tório (EISENBUD & GESELL, 1997). No outro extremo do mundo, na costa sudoeste da Índia, 70.000 pessoas vivem em uma faixa de terreno de 55 quilômetros que também contém areias ricas em tório. Estudos realizados em 8.513 pessoas mostraram que a dose é em média 3,8 mSv/ano. Mais de 500 pessoas recebem doses de mais de 8,7 mSv, cerca de 60 recebem mais de 17 mSv (50 vezes a dose média devida à radiação terrestre) (MAZZILLI et al., 2016).

Os principais fatores que influenciam nos níveis de exposição à radiação terrestre são a concentração de radionuclídeos presente nos solos, a qual depende da geologia local, bem como

o tipo de material utilizado para construção civil e a forma de vida e da geologia local.

A formação e a origem da crosta terrestre são os principais fatores atuantes no transporte de materiais enriquecidos em urânio, tório e potássio (GEOSCIENCE AUSTRALIA, 2012). Essa mobilização ocorre por meio da atuação dos processos metamórficos, de fusão crustal, metassomatismo e migração de fluidos. A distribuição desses elementos nas várias litologias está diretamente ligada a esses processos, os quais, normalmente, ocorrem em diferentes profundidades na crosta terrestre e com variação na escala do tempo.

Rochas de composição mineralógica caracterizada essencialmente por quartzo e plagioclásio apresentam baixas concentrações de K, U e Th, enquanto que as rochas compostas por micas, feldspatos e minerais acessórios como o zircão, a apatita e a monazita, contêm teores maiores desses elementos. Há, assim, um crescimento dos teores de K, U e Th com o aumento do teor de sílica na rocha, com as rochas félsicas apresentando valores mais elevados do que as das rochas básicas (SAPUCAIA et al, 2005).

Rochas ígneas, também conhecidas como rochas magmáticas, são formadas pela solidificação (cristalização) do magma, que é um líquido proveniente do interior da Terra, cuja temperatura pode variar de 700 a 1200^{o}C. Elas podem conter jazidas de vários metais (p. ex. ouro, platina, urânio, cobre, estanho) e trazem à superfície do planeta importantes informações sobre as regiões profundas da crosta e do manto terrestre. Os granitos são uma grande fonte de radionuclídeos naturais (EISENBUD & GESELL, 1997).

Por outro lado, os folhelhos, os arenitos e as rochas carbonatíticas apresentam baixos teores de radionuclídeos naturais. As argilas podem conter concentrações de atividade mais elevadas. Nesse caso, incluem-se as zirconitas e as biotitas (SAPUCAIA et al, 2005).

Na Tab. 1.2, são apresentados resultados das concentrações de atividade de radionuclídeos naturais presentes em diferentes tipos de rochas.

Tab. 1.2. Radioatividade presente em diferentes tipos de rochas

Material	K-40		Th-323		U-238	
	% K	Bq/kg	ppm	Bq/kg	ppm	Bq/kg
Rochas ígneas						
Basalto	0,8	300	3-4	10-15	0,5-1	7-10
Granito	>4	>1000	17	70	3	40
Rochas Sedimentares	2-3	600-900	2	<8	1-2	10-25

(Fonte: EISENBUD & GESELL, 1997).

É fato conhecido que a radioatividade em materiais de construção e a radiação que provém do solo são responsáveis pela maior parte da exposição à radiação, à qual estão submetidos os seres humanos (UNSCEAR, 2008). Nas regiões onde já existe a ocorrência de altos níveis de radioatividade, deve-se constatar que os agregantes naturais utilizados na construção civil, como argilas, cerâmicas, areias, cimento, pedras laminadas e britadas, não possuam concentrações de atividade de radionuclídeos naturais elevadas. Dependendo da origem da matéria-prima, os tijolos cerâmicos, as cerâmicas vitrificadas, as pedras de revestimentos de piso e bancadas (como o granito, a ardósia e o gnais) podem ser contribuintes consideráveis de radiações ionizantes nos ambientes construídos.

Tab. 1.3. Valores médios e máximos de concentrações de atividade presente em materiais utilizados na construção civil.

Material	Valores típicos de concentração ($Bq.kg^{-1}$)			Valores máximos de concentração ($Bq.kg^{-1}$)		
	Ra-226	Th-232	K-40	Ra-226	Th-232	K-40
Concreto	40	30	400	240	190	1600
Concreto aerado ou de baixo peso	60	40	430	2600	190	1600
Cimento	50	20	160	204	192	550
Tijolos de argila	50	50	670	200	200	2000
Pedregulhos	60	60	640	500	310	4000
Gesso natural	10	10	80	70	100	200
Fosfogesso	390	20	60	110	160	300
Escória de alto-forno	270	70	240	2100	340	1000
Cinzas de carvão mineral	180	100	650	1100	300	1500

(Fonte: EUROPEAN COMMISSION, 1999).

Na Tab. 1.3, são mostrados valores de concentrações de atividade médias e máximas presentes em diferentes tipos de materiais utilizados na construção civil.

Os níveis de exposição são mais elevados em ambientes fechados, como no caso das minas subterrâneas, das casas e edifícios e de locais de trabalho onde haja materiais radioativos, e onde normalmente, as taxas de ventilação e renovação do ar são reduzidas. Nas zonas temperadas, onde as casas permanecem fechadas uma boa parte do tempo, os níveis de exposição são mais elevados do que na região do Equador. Nesse caso, a concentração de ^{222}Rn e seus produtos de decaimento no interior das residências pode ser oito vezes superior àquela observada no ar exterior (MAZZILLI et al., 2016).

1.4. Radônio e torônio

Dentro dos radionuclídeos descendentes do ^{238}U destaca-se o ^{226}Ra, que possui meia-vida de 1.600 anos, e que, por emissão alfa, forma o ^{222}Rn, o radônio, de meia-vida de 3,82 dias. Seus descendentes são o ^{218}Po, ^{214}Pb, ^{214}Bi e ^{214}Po, todos com meias-vidas muito curtas. Na série do ^{232}Th ocorre um processo semelhante, com o ^{220}Rn, também chamado de torônio, de meia-vida de 55 segundos e seus descendentes, ^{216}Po, ^{212}Pb, ^{212}Bi, ^{208}Tl e ^{212}Po.

A maioria das rochas, solos, sedimentos e minérios contêm concentrações significativas de urânio e tório. Como consequência dos decaimentos, estes materiais contêm também os radionuclídeos pertencentes às famílias radioativas. Uma vez que o radônio e o torônio são gasosos, nos ambientes construídos por materiais como cerâmica, revestimento de pedra, granito, argamassa, concreto, gesso, entre outros, vai ocorrer o fenômeno da emanação desses gases radioativos. Por possuírem um peso atômico elevado, sua concentração é maior em níveis próximos ao solo, devido à decantação gravitacional.

Assim, juntamente com os gases componentes do ar, o homem e os animais respiram gases e aerossóis radioativos.

O radônio emana do solo em todas as direções, conforme mostrado na Fig. 1.4. O grau de exposição a esses radionuclídeos aumenta de forma significativa em ambientes fechados. As taxas de exposição dependeram do teor de urânio e tório presentes no solo e dos níveis de radioatividade dos materiais de construção utilizados. O isolamento térmico pode agravar ainda mais a situação.

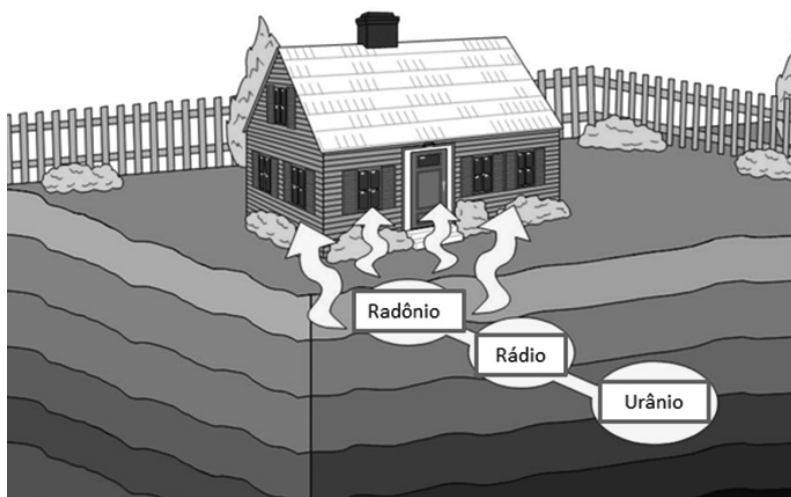



Fig. 1.4. Emanação do gás radônio formado no solo a partir do decaimento radioativo do rádio e urânio.

A água e o gás natural constituem outra fonte importante de radônio nas moradias. A UNSCEAR (2008) estimou que, pelo menos, 1% da população mundial consome água que

contém mais de um milhão de bequeréis de atividade por metro cúbico, e que, pelo menos, 10% bebe água com mais de 100.000 Bq/m^3. No entanto, o consumo de água que contenha concentrações elevadas de radônio não é o principal problema do ponto de vista radiossanitário, uma vez que grande parte desta água é utilizada para cozinhar alimentos.

A ingestão de água não é relevante, uma vez que o radônio é eliminado rapidamente do organismo por ser quimicamente inerte. O maior risco é causado pela inalação do radônio, especialmente, durante o banho. Estudos realizados em residências finlandesas mostraram que, em média, a concentração de radônio presente nos banheiros é três vezes superior à existente na cozinha e 40 vezes mais alta que a detectada em salas de estar (MAZZILLI et al., 2016).

Por ser um gás inerte, o ^{222}Rn não interage com o trato respiratório; os danos devidos à sua inalação são, na realidade, causados pelos seus filhos de meia-vida curta, os radioisótopos ^{218}Po, ^{214}Pb e ^{214}Bi, que se depositam no pulmão.

1.5. Distribuição das fontes de radiação natural

A radiação natural é responsável por, aproximadamente, 80% da dose de radiação média anual e as aplicações médicas (uso de raios-X e materiais radioativos em diagnóstico e terapia) contribuem quase que totalmente para as doses provenientes de fontes artificiais a que o homem está sujeito durante o ano. Para se ter uma ideia, o ser humano recebe mais que 2,4 mSv de dose efetiva a cada ano, devido à exposição às fontes naturais de radiação (EISENBUD& GESELL, 1997).

Na Fig. 1.5, é mostrada a distribuição percentual da contribuição relativa à exposição às radiações provenientes de fontes natural e artificial de radiação. As fontes terrestres são responsáveis pela maior parte da dose recebida pelo homem decorrente da radiação natural. Em condições normais, produ-

zem mais de 5/6 das doses efetivas individuais, sendo a maioria por irradiação interna.

Na Tab. 1.4, são apresentados alguns valores anuais médios mundiais de dose efetiva, expressos em mSv, em decorrência da exposição às fontes de radiação natural para diferentes caminhos de exposição, incluindo: 1) a exposição externa devido à emissão de raios gama, levando-se em conta tanto a permanência no interior de construções ("indoor"), como em ambientes externos ("outdoor"); 2) exposição interna decorrente da inalação ou ingestão de radionuclídeos naturais. Como pode ser verificado, a dose efetiva anual decorrente da exposição ao radônio e seus filhos é de aproximadamente 1,2 mSv, ou seja, metade da dose total estimada para todas as fontes naturais.

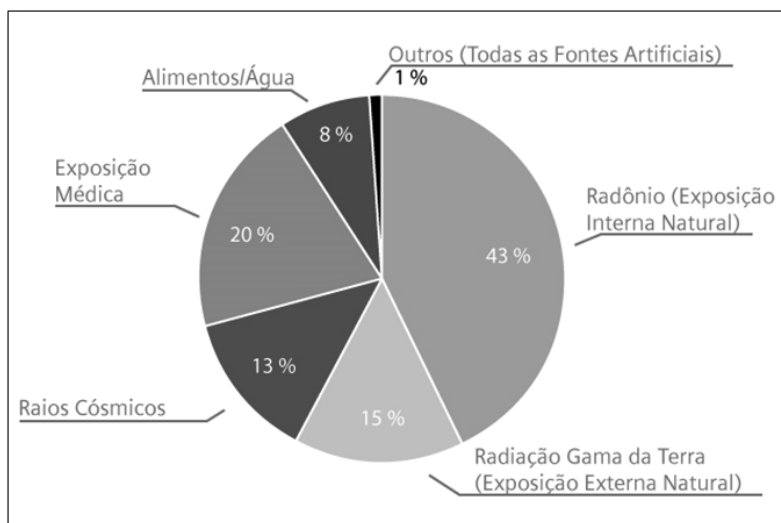



Fig. 1.5. Fontes e distribuição da exposição média à radiação para a população mundial

(Fonte: adaptado de UNSCEAR, 2008).

Tabela 1.4. Média mundial da exposição às fontes de radiação natural.

	Dose Efetiva Anual (mSv)	
Radiação Cósmica	**Média**	**Intervalo**
Fótons	0,28	
Nêutrons	0,10	
Radionuclídeos Cosmogênicos	0,01	
Total	**0,39**	0,3-1,0
Radiação Externa Terrestre		
Outdoor	0,07	
Indoor	0,41	
Total	**0,48**	0,3-0,6
Inalação		
Séries do U e Th	0,006	
^{222}Rn	1,15	
^{220}Rn	0,10	
Total	1,26	0,2-10
Ingestão		
^{40}K	0,17	
Séries U e Th	0,12	
Total	0,29	
Total	**2,4**	1-10

(Fonte: UNSCEAR, 2000).

Referências Bibliográficas

AQUINO, K.A.S. & AQUINO, F.S. *Radioatividade e meio ambiente: os átomos instáveis da natureza.* Disponível em: https://www.ufpe.br/cap/images/quimica/katiaaquino/3anos/complementar/08colaiqradiacao.pdf. Acesso em: 10/01/2016.

BARTLETT, D. T. Radiation protection aspects of the cosmic radiation exposure of aircraft crew. *Radiat. Prot. Dosim.,* v. 109, n. 4, pp. 349-355, 2004.

DORMAN, L.I., *Cosmic rays in the earth´s atmosphere and underground*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2004.

EISENBUD, M. & GESELL, T. *Environmental radioactivity from natural, industrial and military sources.* 4th Edition. England: Academic Press, 1997. 656p.

EUROPEAN COMMISSION. Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials. Radiation Protection 112, 1999.

FEDERICO, C.A. *Dosimetria da radiação cósmica no interior de aeronaves no espaço aéreo brasileiro*. Tese de Doutorado - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. 172p.

FERNANDES, T. *O fim do enigma dos raios cósmicos*. Disponível em: http://cienciahoje.uol.com.br/noticias/astronomia-e-exploracao-espacial/o-fim-do-enigma-dos-raios-cosmicos. Acesso em: 14/01/2016.

GEOSCIENCE AUSTRALIA. *Uranium and thorium geology*. Disponível em: http://www.ga.gov.au/energy/province-sedimentary-basin-geology/uranium-thorium-geology.html. Acesso em: 14/01/2014.

LEWIS, B. J.; BENNETT, L. G. I.; GREEN, A. R.; BUTLER, A.; DESORMEAUX, M.; KITCHING, F.; MACCALL, M. J.; ELLASCHUK, B.; PIERRE, M. Aircrew dosimetry using predictive code for aircrew radiation exposure (PCAIRE). *Radiat. Prot. Dosim*., v. 116, n. 1-4, pp. 320-326, 2005.

MAZZILLI, B.C. MÁDUAR, M. F.; CAMPOS, M.P. *Radioatividade no meio ambiente e avaliação de impacto radiológico ambiental*. Disponível em: https://www.ipen.br/portal_por/conteudo/pos-graduacao/arquivos/201103311026310-Apostila%20TNA-5754%20abr-2011.pdf. Acesso em: 05/01/2016.

SAPUCAIA, N.S.; ARGOLLO, R.M.; BARBOSA, J. S. F. Teores de potássio, urânio, tório e taxa de produção de calor radiogênico no embasamento adjacente às bacias sedimentares de Camamu e Almada, Bahia, Brasil*. Rev. Bras. Geof.* v. 23, n.4, pp. 453-475, 2005.

SOHO. Solar and Heliospheric Observatory. Key Terminology for understanding the Sun. Disponível em: http://soho.nascom.nasa.gov/classroom/glossary_middle.html._Acesso em: 10/01/2016.

UNITED NATIONS. *Sources and effects of ionizing radiation. Volume I*. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000. Report to the General Assembly, with annexes. United Nations sales publication E.00.IX.3. United Nations, New York, 2000.

UNITED NATIONS. *Sources and effects of ionizing radiation. Volume I*. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2008 Report to the General Assembly, with annexes. United Nations sales publication E.10.XI.3. United Nations, New York, 2008.

NASA, *Jet Propulsion Laboratorypia16938*: Sources of Ionizing Radiation in Interplanetary Space. Disponível em: http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA16938. Acesso em: 15/04/2016.

ZEITLIN, C.; HASSLER, D.M.; CUCINOTTA, EHRESMANN, A.B.; WIMMER-SCHWEINGRUBER, R.F.; BRINZA, D.E.; KANG, S.; WEIGLE, G.; BÖTTCHER, S.;E. BÖHM, E.; BURMEISTER, S.; GUO, J.; KÖHLER, J.; MARTIN, C., POSNER, A.; RAFKIN, S.; REITZ, G. Measurements of Energetic Particle Radiation in Transit to Mars on the Mars Science Laboratory. *Science*, v.340, n.6136, pp. 1080-1084, 2013.

4

Comportamento dos Radionuclídeos no Ecossistema

Barbara Paci Mazzilli

1.1 Introdução

Os radionuclídeos primordiais tiveram sua origem nas rochas, mas ao longo do tempo foram se espalhando pelos vários compartimentos do ecossistema até atingir um estado de equilíbrio. Na Figura 1.1, podem-se visualizar as principais vias de transferência dos radionuclídeos primordiais ^{40}K, urânio, tório, ^{226}Ra, ^{228}Ra e o radônio e descendentes (RnD) nos vários compartimentos do ecossistema.

Várias indústrias não nucleares utilizam matérias-primas que podem conter pequenas quantidades de radionuclídeos naturais. Estes radionuclídeos podem, eventualmente, concentrar-se durante o processamento da matéria-prima nos produtos, subprodutos ou resíduos, alcançando valores mais altos. Tais indústrias são capazes de gerar exposições importantes de grupos críticos ou exposições coletivas à radiação natural; tais exposições podem ser incorridas tanto por trabalhadores, quanto pela população que vive nas circunvizinhanças daquelas indústrias, ou mesmo pela população remota pelo uso de subprodutos.

No Brasil, diversas indústrias podem ser classificadas como NORM e sua operação requer um controle radiológico

ocupacional e ambiental adequado às suas características. Dependendo dos níveis de radioatividade, estas indústrias são passíveis de controle pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, o que inclui adequação aos seus regulamentos de proteção radiológica. Tais indústrias encontram-se dispersas por todo o território nacional e, portanto, as características regionais tem papel primordial na exposição da população aos possíveis poluentes liberados pelas instalações. Adicionalmente, grandes áreas contendo rejeitos de processo com radionuclídeos associados (bacias de rejeito, pilhas de estéreis) serão abandonadas ao final das operações e, portanto, ações remediadoras para aquelas áreas visando ao seu uso irrestrito poderão ser necessárias. Portanto, a estimativa deste passivo ambiental é de extrema importância na avaliação do impacto radiológico ambiental causado pelo funcionamento destas instalações. Existe também uma tendência mundial de reúso dos resíduos gerados por estas instalações, e neste caso, também se torna necessário avaliar os impactos radiológicos que podem advir desta prática.

Para se avaliar de forma satisfatória o impacto radiológico ambiental das indústrias NORM, é necessário quantificar o material radioativo liberado na forma de efluentes líquidos e gasosos e estudar como este material se dispersa no meio ambiente até atingir o homem. Quando um radionuclídeo é introduzido no ar ou na água, ele se dispersa e é diluído, espacialmente redistribuído e, finalmente, acumulado em algum compartimento específico do ambiente. O comportamento dos radionuclídeos no meio ambiente é governado por uma série de fatores físicos, químicos e biológicos. Para se entender os efeitos biológicos, deve-se conhecer ou ser capaz de se prever o movimento e a concentração do material no sistema em estudo e a toxicidade química e radiológica dessas concentrações para os componentes bióticos deste sistema.

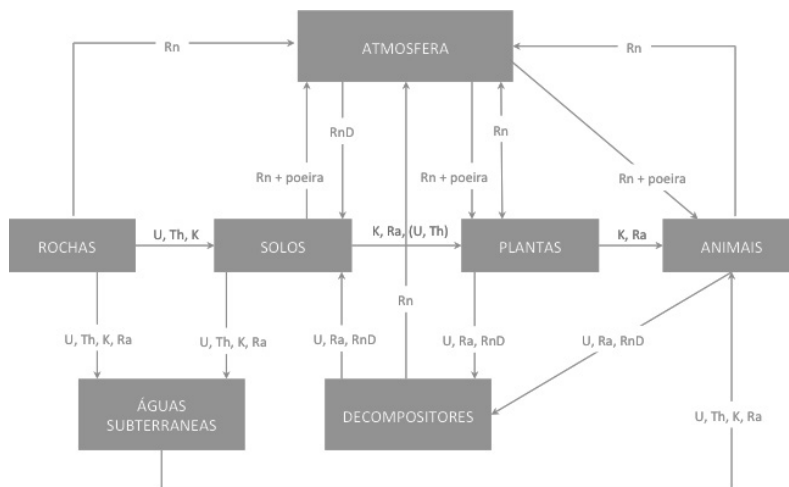



Figura 1.1. Principais vias de transferência dos radionuclídeos primordiais e descendentes nos vários compartimentos do ecossistema.

1.2 Mecanismos de transporte

A descrição da liberação de radionuclídeos no meio ambiente é conhecida como "termo fonte". Esta descrição inclui o conhecimento do tipo de radionuclídeo e sua forma físico-química, da quantidade liberada por unidade de tempo e da configuração geométrica da descarga.

Os radionuclídeos liberados no meio ambiente percorrem diversos caminhos, por meio de vias preferenciais de transferência, até chegarem ao homem. Este movimento pode ser descrito matematicamente por meio de modelos de compartimento. As vias de transferência que contribuem para a maior dose de radiação no homem são conhecidas como vias críticas e são características para cada instalação e meio ambiente receptor.

Quando os radionuclídeos são liberados no meio ambiente, o material se dispersa no meio abiótico. Os comparti-

mentos que recebem o material e que podem, eventualmente, concentrar quantidades consideráveis do radionuclídeo, podem ser constituídos de organismos vivos ou materiais inertes. As quantidades acumuladas em cada compartimento dependem da importância dos processos de transportes envolvidos (figura 1.2).

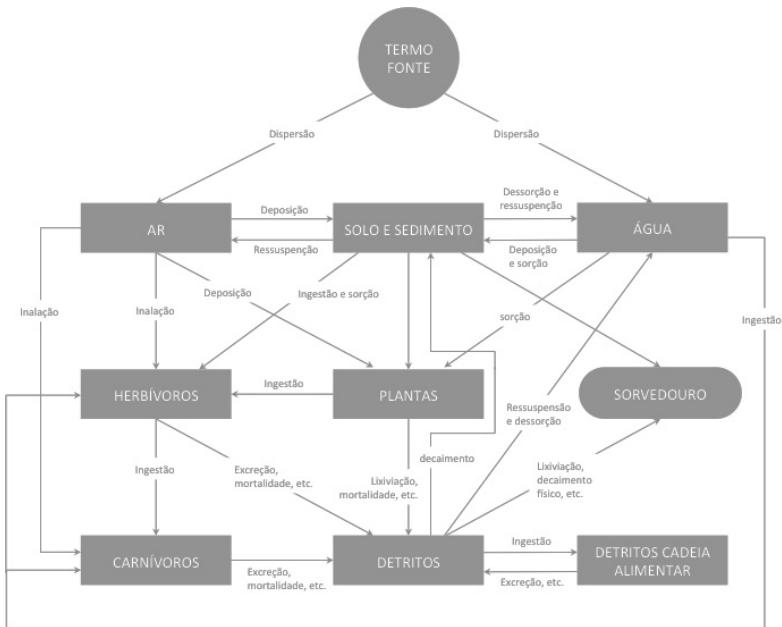



Figura 1.2. Transporte dos radionuclídeos no ecossistema.

A maior parte das descargas radioativas ocorre na forma de material dissolvido ou em suspensão nos efluentes líquidos, ou gases e particulados em efluentes gasosos. O material que entra em um corpo de água ou corrente de ar é imediatamente sujeito a um processo de turbulência e difusão molecular que causa a sua dispersão.

O efeito geral da dispersão é a redução da concentração do radionuclídeo no ar ou na água com a distância do ponto de descarga. A extensão e a rapidez com que este material se dispersa variam com o grau de turbulência do meio aéreo ou aquático.

Os radionuclídeos no ar ou na água são, então, sujeitos ao fenômeno de deposição. Este fenômeno inclui a sedimentação gravitacional, arraste por precipitação, impactação e adsorção ou troca química. A sedimentação gravitacional de partículas em suspensão torna-se relevante para partículas com diâmetro superior a 20mm. O arraste por precipitação ocorre quando os particulados são lavados da atmosfera por cristais de gelo ou gotículas de água. A impactação é o processo pelo qual as partículas em suspensão no ar ou na água colidem com um objeto sólido, enquanto que a corrente é desviada pelo objeto. Como a sedimentação gravitacional, a importância deste processo também aumenta com o tamanho da partícula. A adsorção ou troca química é um processo bem mais complexo, pois depende das propriedades físico-químicas do radionuclídeo bem como da superfície onde a troca ou adsorção ocorre.

Quando o ar ou a água contendo radionuclídeos entra em contato com material sólido como rocha, sedimento em suspensão, vegetação ou plâncton, as partículas apresentam uma alta probabilidade de serem adsorvidas pela superfície desses materiais. Geralmente, os materiais sólidos acumulam a maioria dos radionuclídeos, de forma que a sua concentração no equilíbrio é consideravelmente maior do que no meio aquático ou gasoso circundante. A adsorção costuma aumentar com o aumento da área superficial por unidade de massa ou volume.

A adsorção de radionuclídeos na superfície de um sólido se processa rapidamente. Entretanto, se o meio aquático ou ar é continuamente reabastecido, e se o meio contém concentrações significativas do radionuclídeo durante um longo período de tempo, então, a superfície em questão irá acumular o radio-

nuclídeo e sua concentração aumentará durante um período de tempo bem mais longo.

O aumento ou decréscimo de radioatividade em uma determinada superfície, em certo período de tempo, dependerá da relação entre sua entrada e saída. A razão de entrada aumenta com a concentração do radionuclídeo no meio, a extensão da superfície em contato com o meio, a razão com a qual o meio em contato com a superfície é renovado, com a diminuição da concentração de íons competitivos presentes no meio e muitos outros fatores. As perdas do radionuclídeo, por outro lado, são causadas por fenômenos tais como decaimento físico, lixiviação, ressuspensão ou redistribuição espacial da superfície absorvente.

Um processo de deposição importante que remove radioatividade da atmosfera é a precipitação por arraste, que pode ocorrer na forma de *rainout* e *washout*. No *rainout* partículas de tamanho inferior a *submicron* atuam como um núcleo de condensação, em cuja superfície o vapor de água se condensa formando cristais de gelo que crescem em massa até que a ação da gravidade possa agir sobre elas. No processo de *washout*, partículas geralmente maiores do que 1 mm, são carregadas por cristais de gelo ou gotas de água. Ao precipitar as gotas colidem com partículas de aerossóis que aderem à sua superfície e são carregadas para o solo.

A ressuspensão do solo, sedimento ou material orgânico é um outro processo de transporte que pode ocorrer em várias situações.

Radionuclídeos que se encontram em compartimentos abióticos do ecossistema podem se concentrar nas plantas, base da cadeia alimentar, por assimilação do solo, deposição do ar ou adsorção da água no caso de plantas aquáticas.

O transporte do material radioativo das plantas para os herbívoros ocorre por ingestão. Os herbívoros ingerem, também, radionuclídeos associados com solo ou sedimento. A inalação

de aerossóis constitui uma alternativa adicional de assimilação de radionuclídeos pelos animais. A inalação pode se tornar mais importante do que a ingestão nos casos de radionuclídeos insolúveis em ambientes áridos e poeirentos. Os radionuclídeos presentes nos tecidos dos herbívoros podem ser ingeridos pelos carnívoros através da predação.

Cada etapa da cadeia alimentar fornece uma forma de discriminação, uma vez que cada radionuclídeo se concentra fisiologicamente em um determinado tecido, dependendo de suas propriedades físico-químicas.

A morte de plantas e animais, além de suas secreções e excretas, transporta os radionuclídeos para os reservatórios de detritos orgânicos. Os detritos funcionam como um reservatório significativo de material radioativo que pode reciclar através de compartimentos bióticos por meio da cadeia alimentar dos detritos. A mineralização dos detritos, realizada por microrganismos, libera os radionuclídeos no solo ou sedimento, tornando-os novamente disponíveis por meio da cadeia alimentar ou da inalação do material ressuspenso no ar.

Os compartimentos ambientais que recebem material radioativo e não o liberam para outros compartimentos são denominados sorvedouros. Esses compartimentos são frequentemente constituídos de extratos profundos de solo ou sedimento com praticamente nenhum contato com processos biológicos e protegidos da erosão do vento e da água.

1.3 Fatores que afetam os mecanismos de transporte

Os compartimentos esquematizados na figura 1.2 podem ser definidos como uma entidade estrutural do ecossistema homogênea ao longo do tempo, que recebe, perde e mantém um inventário de substâncias químicas.

A quantidade total de um radionuclídeo presente em um compartimento de interesse pode ser definida como sendo q. A

concentração média de um radionuclídeo (C) em um compartimento é dada pela razão q/M, onde M é a massa do compartimento.

Os principais fatores que podem afetar q ou C são as razões de entrada ou perda do compartimento. Simbolicamente:

razão de entrada ➔ q ➔ razão de saída

A razão de entrada, **Re**, e a razão de saída, **Rs**, são expressas, normalmente, em unidades de radioatividade em função do tempo. Portanto, a derivada de **q** com relação ao tempo (t) é dada por:

$$dq / dt = Re - Rs$$

Se **Re** = **Rs**, **q** é uma constante e o compartimento será definido como um estado estacionário.

Os processos envolvidos com o movimento dos radionuclídeos são, normalmente, de primeira ordem. Nesses casos, **Rs** pode ser expresso por:

$$Rs = Kq$$

A constante **k** pode ser expressa pela razão:

$$k = ln_2 / Tef$$

Onde: **Tef** é definido como meia-vida efetiva e representa o tempo necessário para que um determinado radionuclídeo seja perdido por um compartimento. Este termo leva em consideração todos os mecanismos responsáveis pela perda, tais como, decaimento físico, excreção, transporte, etc.

A expressão que fornece **dq/dt** pode ser integrada de tal forma que q seja expressa em função de **Re**, **k** e **t**. Assumindo

que **Re** é constante ao longo do tempo e que quando **t = 0, q = 0,** pode-se afirmar que:

$$q = (Re/k)\,(1 - e^{-kt})$$

Esta expressão mostra que **q** é proporcional a **Re**, inversamente proporcional a **k** e cresce com o tempo até que seja alcançada a condição de equilíbrio (quando $1 - e^{-kt}$ tende para 1).

Esta equação mostra que a concentração de um radionuclídeo em um compartimento depende da relação entre a razão de entrada e razão de saída. Pode-se, então, definir e medir uma série de razões de entrada (m) e de saída (n), agindo em um determinado compartimento. Genericamente:

$$dq/dt = \sum R(e)_i - q \sum k_j$$

Conclui-se que a variação na concentração de um radionuclídeo em um compartimento é governada por todas as taxas de entrada e de saída. Taxas individuais de entrada e de saída dependem de vários mecanismos associados aos valores de R_e e **k**.

1.4 Propriedades dos radionuclídeos

O movimento e concentração dos radionuclídeos nos vários compartimentos do ecossistema são governados por uma série de fatores que dependem em grande parte das propriedades físicas e químicas do próprio nuclídeo.

Cada elemento da tabela periódica apresenta propriedades químicas semelhantes, enquanto que radioisótopos de um mesmo elemento, geralmente, apresentam meias-vidas e esquemas de decaimento diferentes. Essas diferenças implicam um comportamento ambiental diferente para cada radioisótopo ao longo do tempo.

A maioria dos radionuclídeos se comporta, pelo menos qualitativamente, como seu análogo nutriente essencial. Portanto, os radionuclídeos que se encontram na forma solúvel e são quimicamente análogos a elementos nutrientes essenciais, tendem a seguir os mesmos caminhos nos vários compartimentos do ecossistema.

1.5 Comportamento de grupos específicos de radionuclídeos

O comportamento dos radionuclídeos no ecossistema costuma ser específico, pois depende basicamente de suas características físico-químicas. Entretanto, alguns grupos de radionuclídeos podem apresentar um comportamento ecológico similar devido às suas propriedades químicas.

Os isótopos de rádio pertencem ao grupo dos metais alcalinos terrosos, que apresentam estado de oxidação +2, são altamente reativos e, raramente, encontram-se no estado livre. Formam sais de carbonato, sulfato e cloreto. Existem quatro isótopos naturais do rádio presentes no ambiente: ^{226}Ra produto de decaimento do ^{238}U, ^{228}Ra e ^{224}Ra produto de decaimento do Th e ^{223}Ra da série de decaimento do ^{235}U. Desses isótopos, o ^{226}Ra é emissor alfa e gama com uma meia-vida de 1620 anos, o ^{228}Ra é um emissor beta e gama com uma meia-vida de 5,75 anos e o ^{224}Ra e ^{223}Ra apresentam meia-vida de dias. Por serem isótopos do mesmo elemento químico, apresentam comportamento similar na natureza. Todos são bastante lábeis no meio ambiente e devido à sua similaridade química com o cálcio, tendem a se concentrar nos ossos. Os produtos de decaimento de meia-vida curta do ^{226}Ra e ^{228}Ra podem crescer até atingir o equilíbrio secular dentro do osso hospedeiro, contribuindo substancialmente para a dose de radiação. O impacto radiológico do radio é devido à sua exposição direta e à exposição de seus produtos de decaimento, em particular, a exalação do ^{222}Rn, produto de decaimento do ^{226}Ra e do ^{220}Rn, produto de

decaimento do ^{224}Ra, a partir do solo, materiais de construção e produtos NORM.

Os isótopos de radônio pertencem ao grupo dos gases nobres. Este grupo é também conhecido como dos gases inertes, pois é constituído de gases que, devido à sua configuração eletrônica, não se combinam quimicamente com outros elementos. Os gases nobres, portanto, existem como moléculas monoatômicas. Todos os gases nobres ocorrem naturalmente na atmosfera, como isótopos estáveis, com exceção do Rn que é instável e radioativo. O isótopo de Rn de meia-vida mais longa é o ^{222}Rn, com meia-vida de 3,8 dias, formado pelo decaimento direto do ^{226}Ra presente nas rochas e solos. Os gases nobres não se concentram na cadeia alimentar e tampouco nos tecidos biológicos. Uma exceção é o Rn que pode ser encontrado nos tecidos gordurosos, se formado dentro do organismo pelo decaimento do ^{226}Ra. A principal via de exposição é a imersão na nuvem radioativa e consequente irradiação externa. O ^{220}Rn e ^{222}Rn são importantes quando inalados, pois seus produtos de decaimento de meia-vida longa irradiam os tecidos dos pulmões, podendo induzir câncer.

O U e Th pertencem ao grupo dos actinídeos, que inclui também os elementos transurânicos que são produzidos artificialmente. Todos os actinídeos podem existir em vários estados de oxidação, sendo o mais comum o +3. No caso do Th, o estado de oxidação +4 é mais estável e o U apresenta maior estabilidade no estado +6. A maioria dos actinídeos emite partículas alfa, o que aumenta o risco de irradiação interna. Além do mais, alguns elementos, tais como U-238 e Th-232, apresentam uma massa suficiente para torná-los quimicamente tóxicos. De uma maneira geral, os actinídeos formam compostos insolúveis no meio ambiente e não são considerados biologicamente móveis. Normalmente, acumulam-se nos solos e sedimentos. A saída deste compartimento ocorre por meio de processos geológicos como erosão, e algumas vezes, por lixiviação. O uptake dos ac-

tinídeos do solo para as plantas é bastante baixo, com exceção do urânio, que se acumula em algumas plantas de tal forma que elas funcionam como bioindicador de depósitos de U. No caso de animais terrestres, os actinídeos são assimilados via ingestão e inalação.

Referências Bibliográficas

MAZZILLI, B.C. MÁDUAR, M. F.; CAMPOS, M.P. *Radioatividade no meio ambiente e avaliação de impacto radiológico ambiental*. Disponível em: https://www.ipen.br/portal_por/conteudo/pos-graduacao/arquivos/201103311026310-Apostila%20TNA-5754%20abr-2011.pdf. Acesso em: 05/01/2016.

5

Principais Indústrias Geradoras de NORM

A lista abaixo apresenta uma série de atividades econômicas que são reconhecidas internacionalmente como as principais indústrias em relação à questão NORM. São elas:

- Petróleo e Gás;
- Mineração de carvão e sua combustão;
- Energia geotérmica;
- Tratamento de água potável;
- Tratamento de esgoto;
- Água de uso industrial;
- Água de irrigação;
- Mineração e métodos de processamento: alumínio, ferro, cobre ouro, areias minerais e indústrias relacionadas;
- Mineração de fosfato e produção de fertilizantes;
- Argila, cerâmica e material de construção;
- Produção de ácido sulfúrico, a partir de queima de piritas;
- Queima de xisto para produzir óleo;
- Dragagem de rio e/ou porto;
- Rejeitos do fechamento de uma planta industrial.

Neste capítulo, abordaremos algumas indústrias que, no Brasil, possuem maior probabilidade de ocorrência de NORM. Sendo que, no item A, temos atividades econômicas ligadas à mineração e seu beneficiamento.

5A-1: Monazita
5A-2: Óxido de titânio
5A-3: Zircônio
5A-4: Mineração de fosfato e produção de ácido fosfórico
5A-5: Nióbio
5A-6: Estanho
5A-7: Cobre

No item B, o foco está na indústria de carvão, óleo e gás.

5A-1

Monazita

Dejanira da Costa Lauria

1. O processo

A areia monazítica brasileira é basicamente composta por quatro minerais: ilmenita ($FeTiO_3$); zirconita ou zircão ($ZrSiO_4$); rutilo (TiO_2) e monazita, um ortofosfato de terras raras, contendo até 6% de ThO2 e 0,3% de U_3O_8. Os depósitos mais importantes de areia monazítica, no Brasil, foram encontrados na área costeira brasileira, no norte do estado do Rio de Janeiro.

Ainda próximo ao local da extração, a areia monazítica passa por um processo hidrogravimétrico, utilizando espirais Humpreys para separar e concentrar os minerais pesados contidos na areia. Após esta etapa, a areia volta para o local de onde a areia monazítica foi retirada e o concentrado de minerais é encaminhado para uma planta de processamento. Os teores dos minerais pesados na areia monazítica e no concentrado são mostrados na tabela 1. Pode-se observar que esta primeira etapa do processo concentra os minerais pesados em cerca de dez vezes.

Na planta de processamento físico, os minerais pesados passam por um processo de purificação hidrogravimétrico, são

Tabela 1. Teores dos minerais pesados na areia monazítica e no concentrado (INB, 1996).

	Teor (%)	
Produto	**Areia monazítica**	**Concentrado de minerais pesados**
Ilmenita	3,9-4,3	39,1-43,0
Zirconita	2,3	23,3-23,6
Monazita	0,28-0,65	2,8-6,5
Rutilo	0,18-0,30	1,8-3,0
Sílica	60-85	6,0-8,5
Outros	2,1-2,5	20,5-25,0

secos, e então, são separados por separação física (separação eletromagnética e eletrostática). O processo industrial simplificado é mostrado na figura 1.

O processo produz zirconita (silicato de zircônio), ilmenita (titanato de ferro) e rutilo (dióxido de titânio), que são vendidos diretamente na planta. Atualmente, a monazita não está sendo processada e está sendo estocada.

A fração zirconita é enviada para as empresas de moagem para a produção de uma fração fina de silicato de zircão, para ser usada nas indústrias de cerâmica e porcelana, enquanto que do rutilo e da ilmenita são produzidos óxido de titânio usado na indústria de tintas. A ilmenita proveniente da areia monazítica contribui com 5% do consumo de ilmenita do Brasil (Santos, 2010).

O processamento químico de monazita foi realizado no Brasil até 1994 para produzir cloretos de terras raras. O processo gerou dois subprodutos: a torta de mesotório e o concentrado de tório, ambos subprodutos contêm a maior parte do tório e do urânio, inicialmente, contido no concentrado de monazita. As

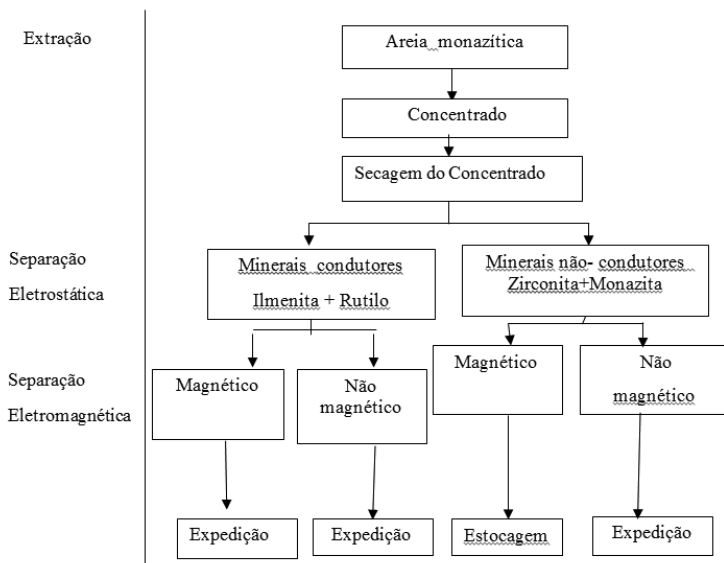



Figura 1. Fluxograma simplificado da separação de minerais pesados.

questões radioecológicas geradas pelo processamento químico da monazita e seus resíduos foram discutidas anteriormente na literatura (Pascoa et al., 1993; Nouailhetas et al., 1993; Lauria et al 2005; Pires do Reis, 2007).

2. Produção de rejeitos

O conteúdo de radionuclídeos naturais em matérias-primas, resíduos e produtos finais da planta de separação física é apresentado na tabela 2. As maiores concentrações de ^{238}U e ^{232}Th estão presentes na fração monazita, seguida por zirconita, rutilo e ilmenita. Deve-se aqui enfatizar que os teores de radionuclídeos vão depender dos teores na matéria-prima utilizada,

e por isto, uma grande variabilidade pode ser encontrada entre os minerais.

Tabela 2. Concentração de radionuclídeos em insumos, produtos e resíduos utilizados e produzidos no processamento físico da areia monazítica.

Material	Concentração de radionuclídeos (Bq/kg)	
	^{238}U	^{232}Th
Areia monazítica	99	520
Concentrado de minerais pesados	2100	7580
Monazita	7300	44500
Zirconita	2300	500
Rutilo	1240	1600
Ilmenita	130	620
Sílica (areia)	10	44
Resíduo sólido	1350	2090

3. Rejeitos líquidos

Na etapa de separação física, o único lançamento para o meio ambiente é o efluente líquido usado no processo hidro gravimétrico na etapa de purificação do concentrado. A água utilizada no processo é bombeada a partir de uma lagoa local e após a sua utilização é devolvida para o corpo d'água. Os dados do programa de monitoramento de efluentes líquidos apresentaram concentrações em torno de 10^{-2} $Bq.L^{-1}$ de U, Th, Ra-226 e Ra-228 (Rio et al., 2007).

4. Rejeitos sólidos

O resíduo sólido produzido no processo físico volta para o início do processo, a fim de ser purificado.

Referências Bibliográficas

Indústrias Nucleares do Brasil (INB), *"Licenciamento do complexo industrial de Buena"*, DRM, 1996.

PASCOA, A.S., *"Overview of Environmental and waste management aspects of the monazite cycle"*, Radiation Protection in Australia 11(4): 170-173 (1993).

NOUAILHETAS, Y.; LAURIAa, D.C.; GODOY, J.M.; REIS, V.R.G. and ZENARO, R., *"Radioecological Questions Concerning the Monazite Sand Cycle Wastes in Brazil",* Radiation Protection in Australia 11(4): 177-181 (1993).

LAURIA, D. C., ROCHEDO, Elaine R R.The *Legacy of Monazite Processing in Brazil.* Radiation Protection Dosimetry. v.114, p.546 - 550, 2005.

LAURIA, D. C., ROCHEDO, Elaine R R. *Evaluating Intervention Options to a Contaminated Land-The USIN Site*. Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento. v.7, p.170 - 175, 2005.

RIO, M. A. P., FERREIRA, P. R. R., LAURIA, D. C., V. P. Melo. *Radiological Impacts Associated with Zircon Sand Processing Plant in Brazil In*: NORM V-5th International Symposium on NORM, 2007, Servilha.

5A-2

Óxido de Titânio

Dejanira da Costa Lauria

1. O processo

O pigmento de óxido de titânio é produzido a partir dos minerais rutilo (TiO_2) e ilmenita ($TiO_2 \cdot FeO$). No Brasil, a principal mina de minério de titânio localiza-se na costa Nordeste do Brasil, no litoral paraibano. Esta mina é responsável por 75% da produção de concentrados de ilmenita e rutilo no território nacional. Uma outra empresa, situada em Goiás, explora minério de magnetita titanífera e responde, atualmente, por 20% da produção do minério de titânio produzido no país. Os demais 5% de ilmenita e rutilo são extraídos da areia monazítica pelas Indústrias Nucleares do Brasil.

A produção mineral atual está praticamente estabilizada no patamar de 130.000 toneladas ano. A produção brasileira de dióxido de titânio é da ordem de 60 mil toneladas, como o consumo é da ordem de 80-90 mil toneladas, o Brasil importa cerca de 30 mil toneladas do óxido por ano.

Ainda no local da extração ocorre um processo de pré-concentração (pré-tratamento), utilizando-se espirais Humpreys. As areias e resíduos são bombeados de tal forma a reconstituírem a topografia original do local. O pré-concentrado é transportado até a planta industrial, onde é realizada a separação da ilmeni-

ta, zircão, rutilo e cianita, com o auxílio de separadores magnéticos e eletrostáticos, além de separadores gravimétricos, como mesas vibratórias e espirais.

Dois são os processos principais para produção do óxido de titânio, o processo via sulfonação e o processo pela via cloração. O processo via sulfonação é o processo utilizado no Brasil (MME, 2010).

No processo original, via sulfonação, a ilmenita é seca, mascerada, misturada com ácido sulfúrico e aquecida até que uma reação exotérmica tem início entre o ácido sulfúrico e o minério. Uma torta sólida é formada composta basicamente de sulfatos de titânio e ferro.

A torta formada é dissolvida com uma mistura de água e ácido recuperado do processo. Em um tanque separado, o íon férrico da solução é reduzido a ferroso utilizando-se sucata de ferro como agente redutor. O precipitado, sulfato ferroso hidratado ($FeSO_4.7H_2O$), sedimenta e a fase líquida é separada da fase sólida por centrifugação e filtração. A solução contendo sulfatos de titânio e ferro é concentrada por evaporação a vácuo e em seguida TiO_2 é precipitado. O dióxido hidratado de titânio é filtrado e extensivamente lavado para remover impurezas. O sólido é calcinado a 1000°C para formar cristais de TiO_2 (EC, 2003).

2. Produção de rejeitos

O pigmento TiO_2 altamente purificado é completamente livre dos radionuclídeos contidos originalmente no minério. Emissões aéreas, afora o radônio contido no minério, são negligenciáveis. Consequentemente, toda a radioatividade presente no minério estará no efluente líquido e sólido (EC, 2003).

3. Rejeito líquido

Não há dados disponíveis na literatura sobre os teores de radionuclídeos nos efluentes líquidos liberados de plantas

industriais de TiO_2 que usam o processo sulfúrico. As indústrias que reduzem a acidez dos seus efluentes pela neutralização e precipitação de gesso podem reduzir consideravelmente as liberações de radionuclídeos, visto que os sulfatos de rádio e o chumbo serão precipitados com o gesso, juntando-se, assim, com a maior parte dos sólidos que não foram dissolvidos (EC, 2003).

4. Rejeito sólido

Não há dados disponíveis na literatura sobre os teores de radionuclídeos nos efluentes sólidos e subprodutos de plantas industriais de TiO2 que usam o processo sulfúrico. Deve-se ainda considerar que no processo sulfúrico é gerado sulfato de rádio nos canos.

Os resíduos produzidos na indústria no Brasil são composto basicamente de sulfato ferroso, facilmente convertido em sulfato férrico, que possui amplo emprego em diversas indústrias, na alimentação animal e para o tratamento de água (MME, 2010).

Referências Bibliográficas

Ministério de Minas e Energia – MME, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral-SGM, Produto 16-Titânio, Relatório Técnico 36, Perfil do Titânio, Consultor: Juarez Fontana dos Santos, Fevereiro 2010, 28p.

European Commission (EC). Effluent and dose control from European Union NORM industries, Assessment of current situation and proposal for a harmonised Community approach, Radiation Protection 135, Volume 1: Main Report, 2003, 188p.

5A-3

Zircônio

Dejanira da Costa Lauria

1. Zirconita ou zircão (ZrSiO4)

Zirconita é um minério de zircônio usado, principalmente, em fundição de aço e ferro em altas temperaturas, em materiais e produtos refratários e em cerâmica fina. Em menor volume, é utilizado como aditivo em tipos especiais de vidro. Outros usos para o zircão e minerais associados de zircônia e zircônio incluem materiais abrasivos, catalisadores, tintas, revestimentos de combustível e materiais estruturais em reatores nucleares (UNSCEAR 1993).

As ocorrências e/ou depósitos de minério de zircônio no Brasil estão associados aos minerais pesados de titânio como a ilmenita ($FeTiO_3$) e o rutilo (TiO2) e de estanho (cassiterita, SnO_2). Os depósitos primários estão relacionados a depósitos de segregação magmática. Os secundários são do tipo placer e associados a cordões litorâneos, depósitos marinhos, depósitos de aluviões e paleoaluviões. Tais reservas encontram-se distribuídas nos seguintes estados: Amazonas, Rio de Janeiro, Minas Gerais, São Paulo, Paraíba, Rio Grande do Sul e, de forma menos expressiva, nos estados de Tocantins e Bahia. No Brasil, a produção de minérios de zircônio, em 2013, foi de,

aproximadamente, 21,1 mil toneladas. A produção é quase que inteiramente utilizada na fabricação de produtos cerâmicos, pisos e revestimentos (DNPM, 2014).

Em uma compilação das doses em trabalhadores e membros do público relacionadas à indústria de cerâmica e de refratários, Selby (2008) advoga que estas indústrias seriam candidatas a serem isentas de regulamentação, uma vez que a dose anual de trabalhadores é, geralmente, inferior a 1 mSv e que a dose de membros do público, devido ao uso destes produtos, é da ordem de 100 μSv. Ressaltando-se os cuidados e as limitações que devem ser tomados em relação à restrição de poeira e sua inalação.

2. Produção de rejeitos

Os de efluente aereos são as maiores emissões que se dão na indústria da cerâmica. A temperatura de queima dos fornos é entre 1000 e 1200° C, resultando na volatilização no processo de queima de entre 40 e 100% do ^{210}Po contido no mineral original. No entanto, a fração emitida e a taxa de transferência para o ambiente de ^{210}Po vai depender da altura da chaminé e das condições de poeira e existências de filtros.

3. Rejeitos sólidos

O beneficiamento físico envolvendo britagem, moagem e peneiramento pode gerar poeiras, como único problema de rejeitos. Por esta via, nesta etapa do processo, pode haver uma perda de minério entre 0,1% e 1% (EU, 2003).

Referências Bibliográficas

J.H. SELBY. *The Industrial Uses of Zircon and Zirconia and the Radiological Consequences of these Uses, Naturally Occurring*

Radioactive Material, (Norm V) International Atomic Energy Agency, Vienna, 2008, 95-116

Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (DNPM). Marcos Antônio Soares Monteiro. Sumário Mineral 2014, 2 páginas.

European Commission (EC). *Effluent and dose control from European Union NORM industries, Assessment of current situation and proposal for a harmonised Community approach, Radiation Protection 135*, Volume 1: Main Report, 2003, 188p.

5A-4

Mineração de Fosfato e Produção de Ácido Fosfórico

Barbara Paci Mazzili

As reservas mundiais de rocha fosfática são de, aproximadamente, 66 bilhões de toneladas de P_2O_5. A produção mundial de fosfato, em 2013, foi de 223 milhões de toneladas, sendo o maior produtor a China, com 43,4%, seguida em menor escala pelos Estados Unidos, Marrocos, Rússia e Brasil. Estes países são responsáveis, por 70% do consumo mundial de fertilizante, juntamente com a Índia a União Europeia, excluindo o Marrocos.

De acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral, a produção de P_2O_5 no Brasil, em 2013, foi de 6,7 milhões toneladas, sendo considerado o maior produtor de fosfato na América do Sul (DNPM, 2014). Ao contrário das reservas mundiais, que ocorrem, principalmente, em rochas sedimentares, com teores entre 25% e 33% de P_2O_5 e com maior uniformidade e mineralogia mais simples, as reservas brasileiras ocorrem em rochas ígneas carbonatíticas, com teores médios de 10-11% de P_2O_5 e com mineralogia mais complexa e baixo grau de uniformidade, resultando em um aproveitamento industrial mais complexo e, consequentemente, com custos mais elevados.

A produção de rocha fosfática no Brasil é realizada, principalmente, nos complexos de Tapira-MG, Araxá-MG, Catalão-GO e Cajati-SP, com teores de P_2O_5 na rocha torno de 10%. Após a extração do minério ocorre sua concentração em usinas localizadas nos próprios complexos, que elevam os teores para cerca de 37% de P_2O_5, produto esse a ser utilizado na produção de ácido fosfórico. O maior produtor nacional é o complexo localizado no município de Tapira, responsável em 2012 por 30% da produção nacional de concentrado, enviado para o município de Uberaba para a produção de ácido fosfórico e fertilizantes. O município de Catalão foi responsável, no mesmo período, por 35% da produção nacional de concentrado. Outro complexo de produção de concentrado a ser mencionado localiza-se no Município de Cajati, respondendo por 8% da produção nacional (DNPM, 2013). As indústrias nacionais que produzem fertilizantes fosfatados utilizam, principalmente, a rocha fosfática proveniente de Tapira-MG, Catalão-GO e Cajati-SP.

O principal constituinte da rocha fosfática brasileira é a apatita (carbonatito), de origem ígnea. Nas indústrias brasileiras, o ácido fosfórico é produzido pelo ataque da rocha com ácido sulfúrico. Este processo forma um precipitado de sulfato de cálcio, conhecido como fosfogesso, que é estocado e considerado resíduo devido ao seu conteúdo de impurezas. O fosfogesso formado no processo é filtrado e bombeado para lagoas, onde é estocado por um período suficiente para permitir sua completa deposição. Esse resíduo é, então, transferido para pilhas próximas à instalação, onde é estocado a uma taxa de, aproximadamente, $12,5x10^6$ toneladas por ano.

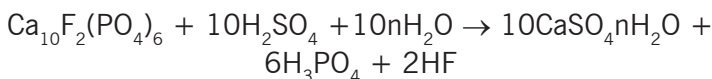
A rocha fosfática apresenta em sua composição radionuclídeos das séries naturais do U e Th em equilíbrio. Os níveis de impurezas presentes no fosfogesso (metais e radionuclídeos, entre outros) tornam o seu descarte em pilhas ou sua reutilização um problema ambiental.

Todos os países que produzem fertilizantes fosfatados pelo processo de ataque ácido da rocha fosfática tem o desafio de encontrar aplicações seguras do fosfogesso, de forma a minimizar o impacto causado pela disposição de grandes quantidades de fosfogesso em pilhas.

Vale a pena salientar, também, o papel importante que a reciclagem e a reutilização de resíduos industriais desempenham no desenvolvimento sustentável. Portanto, pesquisas visando ao desenvolvimento de tecnologias seguras e economicamente viáveis de utilização do fosfogesso são de extrema importância, uma vez que o fosfogesso é considerado um resíduo abundante e de baixo custo, e sua reutilização pode contribuir para a preservação de fontes naturais.

Fluxo de radionuclídeos no processo de acidulação com ácido sulfúrico

A produção do ácido fosfórico e fosfogesso pode ser descrita pela reação:

$$Ca_{10}F_2(PO_4)_6 + 10H_2SO_4 + 10nH_2O \rightarrow 10CaSO_4nH_2O + 6H_3PO_4 + 2HF$$

Na rocha fosfática, as séries naturais de decaimento do U e Th encontram-se em equilíbrio. Durante o processo industrial, este equilíbrio é quebrado e os radionuclídeos migram para os produtos, subprodutos e resíduo de acordo com suas propriedades químicas e solubilidade. A produção de uma tonelada de ácido fosfórico resulta na geração de 4-5 toneladas de fosfogesso. A caracterização dos radionuclídeos nas indústrias brasileiras mostra que os isótopos de rádio, ^{210}Pb, ^{210}Po e os isótopos de tório migram preferencialmente, para o fosfogesso, onde encontram-se porcentagens (em relação à rocha fosfática) de 90% (dos isótopos de rádio), 100% (^{210}Pb), 78% (^{210}Po) e

80% (dos isótopos de tório). Os isótopos de urânio migram, preferencialmente, para o ácido fosfórico na forma de complexos de fosfato de uranila, sulfato e fluoreto. A figura 1 mostra o fluxo e distribuição dos radionuclídeos no processo de extração com ácido sulfúrico.

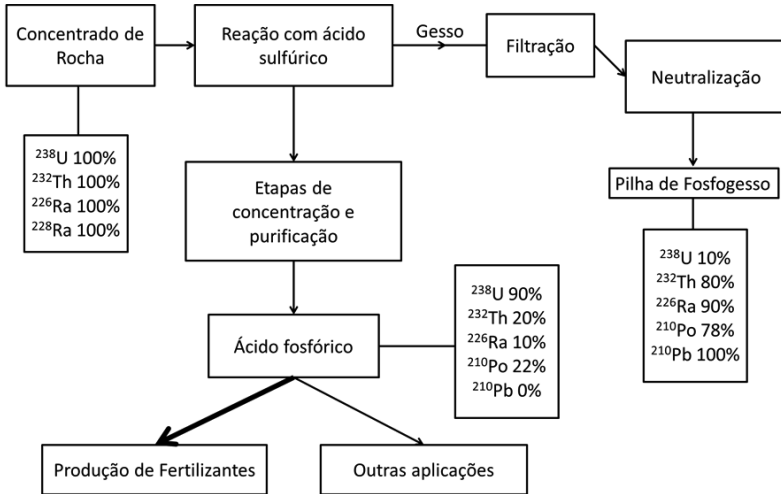
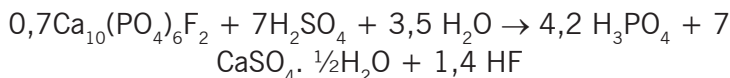



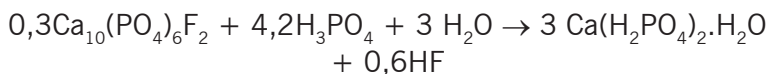
Figura 1 – Fluxo e distribuição dos radionuclídeos no processo de extração com ácido sulfúrico.

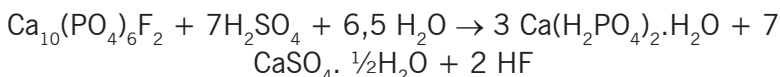
Concentração de radionuclídeos nos fertilizantes fosfatados e no fosfogesso

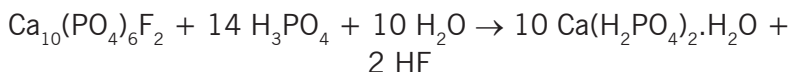
Os principais fertilizantes fosfatados comercializados no Brasil são o superfosfato simples (SSP), o superfosfato triplo (TSP), monoamônio fosfato (MAP) e diamônio fosfato (DAP). Durante o ataque químico do concentrado de rocha, dependendo das condições do processo pode ser produzido o fertilizante SSP ou o TSP.

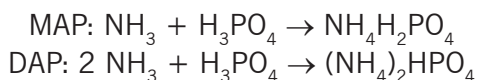
No processo de obtenção do SSP, o ácido sulfúrico reage com a apatita gerando ácido fosfórico, sulfato de cálcio e ácido fluorídrico, segundo a reação:

$$0,7Ca_{10}(PO_4)_6F_2 + 7H_2SO_4 + 3,5\ H_2O \rightarrow 4,2\ H_3PO_4 + 7\ CaSO_4.\ ½H_2O + 1,4\ HF$$

O ácido fosfórico produzido ataca a apatita que não reagiu para formar o fosfato monocálcico e ácido fluorídrico.

$$0,3Ca_{10}(PO_4)_6F_2 + 4,2H_3PO_4 + 3\ H_2O \rightarrow 3\ Ca(H_2PO_4)_2.H_2O + 0,6HF$$

A reação global obtida no processo é descrita a seguir:

$$Ca_{10}(PO_4)_6F_2 + 7H_2SO_4 + 6,5\ H_2O \rightarrow 3\ Ca(H_2PO_4)_2.H_2O + 7\ CaSO_4.\ ½H_2O + 2\ HF$$

No processo de fabricação do TSP, o ácido fosfórico reage com a apatita para formar o superfosfato triplo segundo a reação:

$$Ca_{10}(PO_4)_6F_2 + 14\ H_3PO_4 + 10\ H_2O \rightarrow 10\ Ca(H_2PO_4)_2.H_2O + 2\ HF$$

Os fosfatos de amônio são produtos intermediários e são comercializados dois tipos: o MAP e o DAP. A obtenção deles é feita pela reação do ácido fosfórico com amônia anidra (NH_3) em proporções adequadas, segundo as reações:

$$MAP:\ NH_3 + H_3PO_4 \rightarrow NH_4H_2PO_4$$
$$DAP:\ 2\ NH_3 + H_3PO_4 \rightarrow (NH_4)_2HPO_4$$

Uma revisão de dados sobre a concentração de atividade encontrada na rocha fosfática, fosfogesso e fertilizantes fosfa-

tados das principais indústrias brasileiras é apresentada na figura 2. Essas indústrias utilizam, principalmente, as rochas fosfáticas provenientes de Tapira e Catalão. Todos os radionuclídeos analisados migram preferencialmente para o fosfogesso, com exceção dos isótopos de urânio, que se concentram no ácido fosfórico e nos fertilizantes MAP e DAP devido à grande afinidade química deste elemento com os fosfatos. Observa-se também que os fertilizantes SSP e TSP apresentam em sua composição todos os radionuclídeos na mesma concentração da rocha fosfática usada como matéria-prima. As indústrias que utilizam a rocha fosfática proveniente de Cajati apresen-

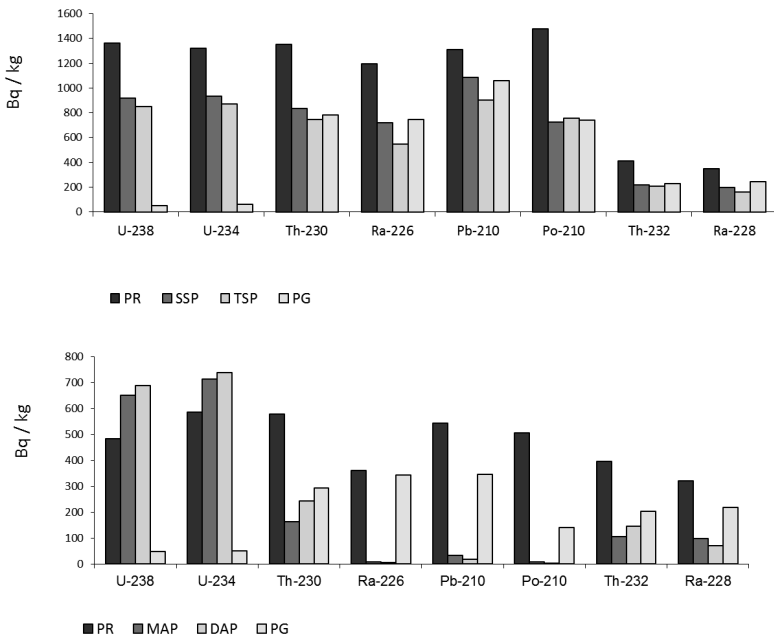



Figura 2. Concentração dos radionuclídeos na rocha fosfática (PR), fosfogesso (PG) e fertilizantes fosfatados (TSP, SSP, MAP e DAP).

tam concentrações de U, Th e descendentes da mesma ordem de grandeza do solo.

Existem inúmeros trabalhos publicados na literatura especializada sobre a caracterização radiológica do fosfogesso brasileiro (Mazzilli e col., 2000; Silva e col., 2001; Saueia e col., 2005; Saueia & Mazzilli 2006; Saueia e col., 2009). Na tabela 1, são apresentados os intervalos de concentração de atividade dos radionuclídeos da série do urânio, ^{238}U, ^{234}U, ^{230}Th, ^{226}Ra, ^{210}Pb e ^{210}Po, e da série do tório, ^{232}Th e ^{228}Ra, presentes no fosfogesso obtido a partir da rocha fosfática de Tapira e Catalão. As maiores concentrações de atividade da família do urânio são encontradas nas indústrias que utilizam a rocha fosfática proveniente do Complexo Carbonatítico de Catalão. As concentrações de atividade da família do tório encontradas nas indústrias que utilizam a rocha fosfática do Complexo Cabonatítico de Tapira e de Catalão são bastante similares.

	ROCHA FOSFÁTICA DE CATALÃO	**ROCHA FOSFÁTICA DE TAPIRA**
U-238	20-69	31-61
U-234	13-63	37-52
Th-230	631-978	251-392
Ra-226	450-1251	249-594
Pb-210	539-1234	303-581
Po-210	541-777	134-344
Th-232	47-346	61-285
Ra-228	163-334	90-247

Tabela 1. Intervalo de concentração de atividade em Bq kg^{-1} para os radionuclídeos no fosfogesso obtido a partir da rocha fosfática de Tapira e Catalão.

Reciclagem do fosfogesso

A pesquisa visando ao desenvolvimento de possíveis usos do fosfogesso torna-se cada vez mais importante, tanto do ponto de vista econômico, como tecnológico e ambiental, uma vez que este é um produto abundante, de baixo custo e cujo aproveitamento evitaria o comprometimento ambiental de grandes áreas onde é armazenado.

Um passo importante no sentido de promover o desenvolvimento de mecanismos para implementar o gerenciamento efetivo de rejeitos e resíduos, incluindo os que contem NORM, foi estabelecido na Agenda 21, no Rio de Janeiro, em 1992. Nesta oportunidade, a United Nations Conference on Environment and Development (UNCED) enfatizou a necessidade de: reduzir a quantidade de resíduos a serem gerados e gerenciar tais resíduos de forma a proteger a saúde humana e o ambiente. Quando os resíduos contendo material NORM apresentam concentração de radionuclídeos naturais acima dos valores de referência estabelecidos, esse material pode, eventualmente, passar a ser classificado como rejeito radioativo. Neste caso, devem ser aplicados os princípios estabelecidos pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 1995) para o gerenciamento de rejeitos radioativos.

Uma etapa crucial, tanto para a indústria quanto para as agências reguladoras de um determinado país, é detectar quando e onde um material NORM pode ocorrer em um processo e também identificar os locais onde se encontram as maiores concentrações de material NORM dentro de um determinado processo. Outra dúvida que surge é qual a concentração de um material NORM capaz de produzir um risco radiológico potencial?

De acordo com o TECDOC 1712, da Agência Internacional de Energia Atômica “Management of NORM Residues” (2013), em seu item 3.4.6, para material contendo radionuclí-

deos de origem natural, o critério geral de dispensa é atendido quando as concentrações de atividade de todos os radionuclídeos nas séries de decaimento do ^{238}U e do ^{232}Th forem menores ou iguais a 1 Bq g^{-1} e a concentração de atividade do ^{40}K for menor ou igual a 10 Bq g^{-1}.

O item 4 desse mesmo documento afirma que há uma tendência universal no sentido de se incrementar a reciclagem de resíduos NORM e de seu uso como subprodutos. Essa atitude tem sido norteada por considerações de sustentabilidade, tais como a preocupação com o esgotamento de recursos não renováveis, pela legislação de proteção ambiental cada vez mais restritiva, pelo crescente reconhecimento de que a quantidade de resíduos NORM depositados como rejeitos precisa ser minimizada, de forma que sua deposição possa ser gerenciada, e às vezes, simplesmente por considerações econômicas, algumas das quais se tornam evidentes apenas quando são levados em conta os custos reais e o passivo ambiental da deposição de resíduos NORM como rejeitos. Alguns países estão presentemente incorporando, em seus sistemas regulatórios, a reciclagem de resíduos NORM.

Referências Bibliográficas

DNPM. *Anuário Mineral Brasileiro*. Balanço Mineral Brasileiro. Departamento Nacional da Produção Mineral, Ministério das Minas e Energia. Brasília, DF ISSN 01012053. vol 34. 2014.

IAEA - International Atomic Energy Agency, The principles of Radioactive Waste management, *Safety Series 111-F*, IAEA, Vienna, 1995.

IAEA - International Atomic Energy Agency, TECDOC 1712, *Management of NORM Residues*, Vienna, 2013.

MAZZILLI, B.P.; PALMIRO, V.; SAUEIA, C.H.R.; NISTI, M.B. *Radiochemical characterization of Brazilian phosphogypsum. J. Environ*. Radioactivity, England, v. 49(1), p. 113-122, 2000.

SILVA, N. C., FERNANDES, E. A., CIPRIANI, M., TADDEI, M. H. T. *The Natural Radioactivity of Brazilian Phosphogypsum*, J Radioanal Nucl Chem, v. 249, n. 1, p. 251-255, 2001.

SAUEIA, C.H.; MAZZILLI, B.P.; FÁVARO, D.I.T. *Natural radioactivity in phosphate rock, phosphogypsum and phosphate fertilizers in Brazil*. J. Radioanal. Nucl Chem, Hungria, v. 264(2), p. 445-448, 2005.

SAUEIA, C.H.R., MAZZILLI, B.P. *Distribution of Natural Radionuclides in the Production and Use of Phosphate Fertilizers in Brazil, J Environ Radioact 89*, p.229-239, 2006.

SAUEIA, C.H.R., MAZZILLI, B.P., TADDEI, M.H.T. *Sequential radioanalytical method for the determination of U and Th isotopes, 226Ra and 210Po using alpha spectrometry in samples of the Brazilian phosphate industry*. J Radioanal Nucl Chem v. 281, p. 201–204, 2009.

5A-5

Nióbio

Vanusa Maria Delage Feliciano

1. Considerações Gerais

O nióbio é um metal de alto ponto de fusão (2.469º C) do grupo dos metais ditos refratários, que se destaca pelas seguintes características: densidade pouco superior à do ferro, elevada resistência ao ataque por certos ácidos e metais líquidos, baixa resistência à oxidação e supercondutividade a temperaturas inferiores a 264 graus negativos Celsius.

O nióbio possui forte afinidade geoquímica com o tântalo, ou seja, eles são estreitamente associados e encontrados juntos na maioria das rochas e dos minerais em que estão presentes. Na natureza, há mais de 90 espécies minerais de nióbio e tântalo conhecidas, podendo ser citadas: a columbita-tantalita (Fe, Mn) (Nb, Ta_2) O_6, com teor máximo de 76% de Nb_2O_5; o pirocloro (Na_3, Ca)$_2$ (Nb, Ti) (O, F)$_7$, com teor máximo de 71% de Nb_2O_5; o bariopirocloro (Ba, Sr)$_2$ (Nb, Ti)$_2$ (O, OH)$_7$, com teor máximo de 67% de Nb_2O_5; a loparita (Ce, Na, Ca)$_2$ (Ti, Nb)$_2$ O_6, com teor máximo de 20% de Nb_2O_5 e a pandaíta (Ba, Sr)$_2$ (Nb, Ti, Ta)$_2$ (O, OH, F)$_7$ (JÚNIOR FERNANDES). A columbita-tantalita e o pirocloro são as principais fontes de nióbio no Brasil e no mundo.

Alguns desses minerais, em decorrência das características geológicas da região onde se encontram suas reservas, contêm ao U, Th e seus produtos de decaimento (PONDETEIRO, 2006). Portanto, a sua extração e beneficiamento pode levar a geração de rejeitos e resíduos contendo materiais radioativos de ocorrência natural.

2. Aplicações

A aplicação mais importante do nióbio é como elemento de liga para conferir melhoria de propriedades em produtos de aço, especialmente, nos aços de alta resistência e baixa liga usados na fabricação de automóveis e de tubulações para transmissão de gás sob alta pressão. Vem a seguir seu emprego em superligas que operam a altas temperaturas em turbinas das aeronaves a jato. O nióbio é também adicionado ao aço inoxidável utilizado em sistema de escapamento dos automóveis, e ainda na produção de ligas supercondutoras de nióbio-titânio usadas na fabricação de magnetos para tomógrafos de ressonância magnética. Encontra aplicação também em cerâmicas eletrônicas e em lentes para câmeras.

O óxido de nióbio (99% de Nb_2O_5), que representa 13% do mercado mundial de nióbio, é a matéria-prima para a fabricação de produtos especiais como: ferronióbio de alta pureza, níquelnióbio, óxidos especiais de nióbio (grau ótico e grau cristal) e nióbio métalico e suas ligas, os quais se destinam a uma série de usos mais sofisticados como as superligas aeronáuticas, os cerâmicos para opto-eletrônica e os supercondutores. Vale ressaltar que o nióbio, como metal puro, apresenta pouca aplicação (FERNANDES P. Jr).

3. Reservas

O Brasil tem as maiores reservas mundiais de nióbio, seguido por Canadá (províncias de Quebéc e Ontário), Austrália

(província da Austrália Ocidental), Egito, República Democrática do Congo, Groenlândia (território pertencente à Dinamarca), Rússia (Sibéria, República da Yakútia), Finlândia, Gabão, Tanzânia, dentre outros.

Na Tabela 1, são apresentados os dados referentes às reservas e produção mundial de nióbio (pirocloro).

Tabela 1. Reservas Mundiais de Nióbio (Pirocloro)

Países	Reservas (t)	Produção (t)			
	2013	2011	2012	2013	(%)
Brasil	10.693.520	64.657	82.214	73.668	92,81
Canadá	200.000	4.630	4.710	5.000	6,30
Outros Países	nd	732	375	700	0,89
Total	>10.893.520	70.019	87.299	79.368 1	100

Fonte: DNPM, 2014.

As reservas medidas de nióbio (Nb_2O_5) aprovadas pelo Departamento Nacional de Pesquisas Minerais - DNPM e contabilizadas totalizaram 842.460.000 toneladas, com teor médio de 0,73% de Nb_2O_5 e estão concentradas nos Estados de Minas Gerais (75,08%), em Araxá e Tapira; Amazonas (21,34%), em São Gabriel da Cachoeira e Presidente Figueiredo e em Goiás (3,58%), em Catalão e Ouvidor (DNPM, 2014).

As principais jazidas encontram-se associadas aos complexos alcalinos carbonatíticos, sendo eles: 1) o complexo Carbonatito do Barreiro, localizado no oeste do Estado de Minas Gerais, na região do Alto Paranaíba, no município de Araxá; 2) o complexo Ultramáfico-Alcalino e Carbonatítico de Catalão, que se encontra nas bordas da Bacia Sedimentar do Para-

ná, no Estado de Goiás, município de Catalão; 3) o complexo Carbonatito do Morro dos Seis Lagos, localizado no Estado do Amazonas, em São Gabriel da Cachoeira, no noroeste deste Estado (região conhecida como "cabeça de cachorro"), tríplice fronteira entre Brasil, Venezuela e Colômbia (JÚNIOR FERNANDES).

Esses depósitos estão sendo minerados e são responsáveis por mais de 70% da produção mundial de Nb. Os minerais pertencem ao grupo dos pirocloros e o intenso intemperismo a que foram submetidos os carbonatitos facilitam sua mineração a céu aberto.

O depósito localizado no município de Araxá, possui reservas da ordem de 460 milhões de toneladas de minério, com teor médio de 2,5% a 3,0% de Nb_2O_5 e quantidades de até 0,008% de U_3O_8 e 0,13% de ThO_2, que são concentradas ao longo dos processos de beneficiamento e metalurgia do nióbio (PONTEDEIRO, 2006). Na outra mina, situada no município de Catalão, Goiás, as reservas são de 10,2 milhões de toneladas com teor médio de 0,9% de Nb_2O_5. O minério de pirocloro contém até 0,03% de U_3O_8 e 0,05% de ThO_2. Algumas áreas destes carbonatitos apresentam radioatividade natural das mais altas encontradas no território nacional.

No Estado do Amazonas, na parte norte do craton amazônico, tem-se alguns depósitos de Sn, Nb/Ta e Zr, os quais estão relacionados com duas intrusões graníticas do proterozoico médio (± 1.700 Ma). No primeiro deles, a associação mineral característica é do tipo *greisen,* onde se tem quartzo + mica litinífera + topázio + cassiterita + columbita/tantalita. No outro depósito, o minério é constituído por cassiterita, zirconita, columbita/tantalita, pirocloro e xenotima. A maior parte do urânio e tório presentes no minério está alojada na estrutura cristalina desses minerais, à exceção da cassiterita. Na rocha, o minério tem teores médios de 0,176% de Sn, 0,808% de ZrO_2, 0,223% de Nb_2O_5, 0,29% deTa_2O_5, e reservas da ordem de

10.000 t de urânio e tório, com 0,03% de urânio e 0,13% de tório (PONTEDEIRO, 2006).

4. Produção

A extração do minério pirocloro nas minas pode se dar pela utilização ou não de detonadores à base de emulsões especiais. Da mina, o minério pode ser levado em caminhões convencionais ou correias transportadoras até unidade de concentração. Em algumas unidades, o minério é inicialmente britado e moído, até atingir uma granulometria ideal. Após a moagem, o minério passa pelos processos de separação magnética, deslame, flotação e filtragem, processos físicos de onde são retiradas as impurezas. A partir daí, existem diversos procedimentos para a obtenção final de nióbio metálico (JÚNIOR FERNANDES).

Dentre os mais importantes processos de redução do Nb_2O_5, destacam-se as reduções carbotérmicas e silicotérmicas e, finalmente, as reduções metalotérmicas que empregam alumínio, cálcio ou magnésio, como agente redutor. Do ponto de vista industrial, a redução aluminotérmica do Nb_2O_5 é a mais empregada, por três motivos principais: a) o alumínio é facilmente removido do sistema durante as etapas posteriores de refino; b) a aluminotermia corresponde a um processo extremamente exotérmico; c) quando comparada a outras reduções metalotérmicas, a redução aluminotérmica produz um óxido (Al_2O_3) com menor ponto de fusão (2.045°C), o que facilita a separação metal-escória.

5. Processo Produtivo e a Distribuição de Radionuclídeos

No processo de redução aluminotérmica do Nb2O5 ocorrem reações exotérmicas que podem atingir temperaturas da ordem de 1.400o C. Durante esse processo, são geradas grandes quantidades de escória contendo, entre outras impurezas, U, Th

e seus produtos de decaimento. Além disso, o uso de temperaturas elevadas contribui para a geração de poeiras contendo concentrações de atividade elevadas de ^{210}Pb e ^{210}Po (100 a 500 Bq g^{-1}) (IAEA, 2006). Consequentemente, as exposições ocupacionais à radiação externa gama, bem como a inalação de poeira pelos trabalhadores devem ser devidamente controladas.

Pires do Rio (1999) realizou a caracterização radiológica das amostras do processo operacional de duas mineradoras (I e II) de nióbio do Brasil. Vale ressaltar que os processos de extração, beneficiamento do minério e transformação do concentrado em liga de ferro nióbio utilizados pelas duas mineradoras apresentam diferenciações não apenas na escala de suas plantas industriais, mas também em seus processos produtivos, principalmente, devido às diferenciações mineralógicas de suas jazidas, portanto, são esperadas teores de radionuclídeos distintos.

Os resultados da caracterização radiológica das amostras de processo coletadas em cada mineradora são apresentados nas tabelas 2 e 3.

Tabela 2. Caracterização radiológica das amostras de processo da mineradora de nióbio I.

Etapas do processo	**Fluxo de atividade (Bq/ano)**				
	^{238}U	**^{226}Ra**	**^{210}Pb**	**^{232}Th**	**^{228}Ra**
Minério	930	805	1.330	6.390	5.176
Rejeito da separação magnética	1.091	340	720	863	750
Rejeito de deslamagem	1.265	1.381	2.029	8.995	5.278

Rejeito de flotação	770	990	2.440	3.100	1.440
Concentrado de pirocloro	14.620	1.370	710	83.000	8.900
Sulfato de bário	42	26.250	7.400	43	197.300
Escória Metalúrgica	23.138	3.290	2.400	117.600	20.200

Adaptado de Pires do Rio, 1999.

Tabela 3. Caracterização radiológica das amostras de processo da mineradora de nióbio II.

Etapas do processo	Fluxo de atividade (Bq/ano)				
	^{238}U	^{226}Ra	^{210}Pb	^{232}Th	^{228}Ra
Minério	4.550	3.390	7.890	904	2.040
Rejeito da separação magnética	843	941	1.730	293	315
Rejeito de deslamagem	6.700	6.900	6.180	1.754	3.080
Rejeito de flotação	4.985	3.400	7.530	1.040	1.840
Escória metalúrgica	34.819	5.160	435	16.700	6.450
Produto final	64	41	-	23	258

Fonte: Fonte: Adaptado de Pires do Rio, 1999.

No caso da mineradora I (vide Tabela 2), o beneficiamento físico (separação magnética, deslamagem e flotação) não contribui de forma significativa para a alteração das concentrações de atividade dos radionuclídeos, uma vez que a matriz geológica do mineral não sofre nenhum ataque químico.

Dentre os rejeitos gerados nas etapas de beneficiamento físico, o rejeito da separação magnética é o que apresenta menores valores de concentração de atividade dos diversos radionuclídeos analisados. Os rejeitos da deslamagem são os que apresentaram valores mais elevados.

Conforme pode ser verificado na Tabela 2, ocorre uma nítida separação dos radionuclídeos após o processo de beneficiamento químico, o qual envolve a etapa de lixiviação clorídrica do minério. Essa, por sua vez, provoca uma redistribuição dos radionuclídeos e, consequentemente, são observadas variações significativas dos valores das concentrações de atividade nas etapas subsequentes com relação aos valores de concentração obtidos no minério. Os rádios e o chumbo se concentram no sulfato de bário. Os resultados mostram ainda que os rejeitos associados ao sulfato de bário e à escória metalúrgica são os que apresentam os teores mais elevados de radionuclídeos em comparação aos demais rejeitos do processo operacional.

Com relação à mineradora II (vide Tabela 3), é observado o mesmo comportamento de distribuição de concentração de atividade dos radionuclídeos nas diferentes etapas do processo produtivo que da mineradora I. A escória metalúrgica é o rejeito que apresenta maiores valores de concentração de atividade de ^{238}U e ^{232}Th. O ^{226}Ra se concentra mais no rejeito de deslamagem. O produto final é o que apresenta menores valores de concentração de atividade, sendo o ^{228}Ra, o radionuclídeo mais enriquecido nesse material.

Em decorrência da presença de teores elevados de U e Th e seus produtos de decaimento, os rejeitos gerados no processo

de redução aluminotérmica do Nb_2O_5 devem ser monitorados e controlados e, caso necessário, devem ser removidos e depositados em repositórios apropriados. Em particular, a utilização da escória metalúrgica como, por exemplo, como material de construção ou na agricultura não é recomendada, uma vez que essas práticas podem resultar em um aumento significativo, além dos níveis de radiação natural, na dose decorrente da exposição do homem à radiação.

Referências Bibliográficas

COMPANHIA BRASILEIRA DE METALURGIA E MINERAÇÃO - CBMM (2012). *Uso e usuários finais do nióbio*. Disponível em: http://www.cbmm.com.br/br/p/173/usos-e-usuarios-finais-de-niobio.aspx.

JÚNIOR FERNANDES, R. *Nióbio*. Disponível em: https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=3976. Acesso em: 24/03/2016.

Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM (2014). Nióbio – *Sumário Mineral 2014*. Disponível em: http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/niobio-sumario-mineral-2014/view. Acesso em: 23/03/2014.

PIRES DO RIO, M.A. *Indústrias de Mineração Não Nucleares e o Aumento da Exposição à Radiação Natural*. Tese (Doutorado em Ciências). Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes. Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro. 147p.

PONTEDEIRO, E.M.D. (2006). *Avaliação de modelos de impacto ambiental para deposição de resíduos sólidos contendo radionuclídeos naturais em instalações mínero-industriais.* Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Mecânica). Coordenação Dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), Rio de Janeiro. 175p.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – IAEA (2006). *Assessing the need for radiation protection measures in work involving mineral and raw materials*. Safety Report Series 49. Vienna.

DE LAZZARI, C. P. (2003). *Estudo termodinâmico e cinético da redução aluminotérmica do pentóxido de nióbio*. Tese (Doutorado em Engenharia)—Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 225p.

5A-6

Estanho

Flávia Luiza Soares Borges
Paulo Roberto Cruz

O Estanho é um dos mais antigos metais conhecidos, sendo utilizado, desde os primórdios, na composição de ligas de cobre para obtenção do bronze. Atualmente, é utilizado em diversos segmentos industriais, tais como: siderurgia, fabricação de folhas-de-flandres para envase de bebidas e alimentos, soldas, dentre outros. As propriedades do estanho, como alta resistência à corrosão, elevada ductilidade e baixo ponto de fusão, fazem com que o metal seja muito empregado em chapas, tubos, fios e ligas para solda.

O principal mineral de estanho é a cassiterita, ou dióxido de estanho (SnO_2). No Brasil, há ocorrência de cassiterita em vários pontos do território, como nos estados de Rondônia, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Tocantins e Minas Gerais. Entretanto, as principais jazidas brasileiras de estanho estão localizadas na Amazônia, nos estados de Rondônia e do Amazonas. Em sua totalidade, as reservas brasileiras de estanho correspondem a, aproximadamente, 9% das reservas mundiais e a produção nacional coloca o país como terceiro maior exportador de estanho.

A formação da cassiterita está relacionada a processos de diferenciação magmática, associada preferencialmente às rochas graníticas. Entretanto, o minério secundário, produto da ação da erosão sobre as rochas primárias, constitui-se na principal fonte de cassiterita. Em alguns casos, a mineralização do estanho está associada a minerais que contêm tântalo e terras raras, minerais estes responsáveis pelos radionuclídeos das famílias do urânio e tório, sendo que esses radionuclídeos, no beneficiamento físico, tendem a se concentrar nos rejeitos.

Tabela 1: Variação da concentração de atividade de radionuclídeos no minério ROM e escória do processo de beneficiamento da cassiterita.

	Urânio ($Bq.g^{-1}$)	Tório ($Bq.g^{-1}$)	^{226}Ra ($Bq.g^{-1}$)	^{228}Ra ($Bq.g^{-1}$)	^{210}Pb ($Bq.g^{-1}$)
Minério (ROM)	0,17 - 33,32	0,26 - 3,9	0,1 - 3,06	0,26 - 3,17	0,07 - 2,3
Rejeitos	4,7 - 93,1	0,68 - 59,7	2,11 - 24,6	0,53 - 42,6	0,3 - 16,0

Processamento

A extração da cassiterita pode se dar a partir do minério primário – rochas que ainda não sofreram intemperismo e não passaram pelo processo de concentração da cassiterita. Neste caso, o minério passa pelos processos de britagem e cominuição, antes do beneficiamento por meio da flotação ou separação gravimétrica e eletrostática.

Outro método é o da dragagem do minério secundário, encontrado em sedimentos aluvionares em depósitos do tipo *placers*, sendo bombeado para plantas industriais, onde o be-

neficiamento é realizado por meio de lavagem, concentração gravimétrica e separação magnética e eletrostática.

Produção de rejeitos

A concentração de atividade dos radionuclídeos da cadeia do urânio nas etapas do processamento de estanho varia conforme a concentração de urânio no minério. Entretanto, é observado que, no processamento físico, os óxidos de urânio e tório e os radionuclídeos de meia-vida longa ^{226}Ra, ^{228}Ra e ^{210}Pb migram preferencialmente, para os rejeitos, o que enseja um planejamento e disposição adequados desse material.

5A-7

Cobre

Flávia Luiza Soares Borges
Paulo Roberto Cruz

O cobre foi o primeiro metal que o ser humano conseguiu moldar. Ainda no fim do período Neolítico, foram desenvolvidas técnicas de fundir e moldar os metais que trouxeram muitos avanços na confecção das ferramentas de trabalho e de objetos de defesa. A versatilidade do metal é tão grande que ainda hoje o cobre é fundamental para diversas indústrias. Isso se deve às suas propriedades físicas, tais como, alta maleabilidade e ductibilidade. É um bom condutor de calor e eletricidade; apresenta elevada resistência à corrosão e tensão; e facilidade para formar ligas com outros metais. Essas propriedades garantem uma ampla faixa de aplicações, que inclui a geração e transmissão de energia, utilização em equipamentos eletrônicos, tubulações, tintas etc.

O cobre nativo raramente é encontrado na natureza. Normalmente, está associado a outros elementos químicos em várias composições e formas, constituindo diversos minerais. Quando associados a outros elementos, podemos dividir os minerais de cobre em dois grupos: minerais primários ou sulfetados, ocorrentes em zonas mais profundas da crosta terrestre,

com mais alto teor em cobre; e minerais secundários, de origem mais superficial, de menor teor em cobre, que inclui os oxidados, carbonatados e silicatados. Os principais minerais de cobre são a calcopirita, calcocita, covelita, bornita, tetraedrita e enargita, que são minerais sulfetados, e dentre os minerais secundários, podemos citar a Cuprita, Tenorita, Malaquita e Azurita.

No Brasil, as reservas minerais de cobre, em sua maioria, constituem-se de minerais sulfetados, com ouro e prata como subprodutos, e por minerais oxidados. Contudo, devido às suas propriedades geoquímicas também é possível que o cobre ocorra associado a urânio.

O Estado brasileiro com a maior reserva de cobre é o Pará, com aproximadamente 85% das reservas; em seguida, aparecem os Estados de Goiás, com 7%, Bahia, 5%, e Alagoas e Ceará, com 3% e 2%, respectivamente. No estado do Pará, os depósitos de cobre da Província Mineral de Carajás correspondem às maiores reservas brasileiras e são constituídos, majoritariamente, por minerais sulfetados, com ouro e prata associados.

Processamento

De modo geral, o processamento do cobre ocorre em três etapas: Extração e concentração do minério; metalurgia; e eletrodeposição. A etapa de extração e concentração compreende os processos de lixiviação e moagem para que se tenha o concentrado do minério. Em seguida, o concentrado passa por processos pirometalúrgicos ou hidrometalúrgicos, para que sejam separadas as principais impurezas. No processo pirometalúrgico, o concentrado é submetido à fundição e, em seguida, temse o refinamento eletrolítico. Na hidrometalurgia, por sua vez, o concentrado passa por processo de lixiviação, para obtenção da solução fraca de cobre e, posteriormente, extração por solventes e eletrodeposição. Tanto a pirometalurgia quanto a hidrometa-

lurgia são efetivas no processamento do cobre, podendo levar a uma pureza de até 99,96% a 99,99%, respectivamente.

Produção de rejeitos

A concentração de atividade dos radionuclídeos da cadeia do urânio nos rejeitos e resíduos do processamento de cobre varia conforme a concentração de urânio no minério. Entretanto, é necessário que se faça o balanço do processo para verificar as etapas e produtos que concentram os radionuclídeos, visto que, em alguns processos, a concentração de urânio nos resíduos pode ser superior a trinta vezes àquela do minério de cobre concentrado. Ademais, a depender da atividade, devem ser monitorados todos os meios de liberação para o meio ambiente.

Referências Bibliográficas

CRPM. *Modelos de depósitos de cobre do Brasil e sua resposta ao intemperismo*. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/publique/media/modelo_dep_co_liv.pdf

DNPM. *Principais Depósitos Minerais do Brasil*. Volume III. Disponível em: http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set3611.pdf

DNPM. *Sumário Mineral*. 2015. Disponível em: http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2015

DNPM. *Principais Depósitos Minerais do Brasil*. Volume III Disponível em: http://www.simineral.org.br/arquivos/EconomiaMineraldoBrasil2009CobreDNPM.pdf

5B-1

Carvão

Luiz Ernesto Santos de Carvalho Matta

Geração de Energia a carvão - combustão e cinzas

Ao longo dos anos, houve muitas ocasiões em que se afirmava que as geradoras de energia a carvão liberavam mais radioatividade para o meio ambiente (a partir de NORM) do que a liberada pelas integrantes do ciclo do combustível nuclear. Apesar de ter algum fundamento na realidade, a alegação geralmente é incorreta, pois já estão disponíveis tecnologias para redução de emissões – purificadores, filtros e dessulfurização de gases de combustão – os quais atuam de forma a capturar materiais sólidos a partir das emissões gasosas. No entanto, o Po-210 e Pb-210 ainda podem escapar, por serem mais voláteis. Na China, as usinas de energia movidas a carvão são uma importante fonte de radioatividade liberada para o meio ambiente e, assim, contribuem significativamente para o aumento da exposição ao NORM na China. (Wu et al, em NORM VII).

A maior parte do carvão contém urânio e tório, assim, como os seus produtos de decaimento e K-40. As concemtrações individuais dos radionuclídeos, normalmente, não são altas e, geralmente, são aproximadamente da mesma ordem de

grandeza encontrada em outras rochas perto do carvão, que varia de acordo com a região e geologia. A concentração aumentada do radionuclídeo no carvão tende a ser associada com a presença de outros metais pesados e do elevado teor de enxofre. A Tabela 5.1 apresenta alguns valores característicos, embora o carvão em algumas áreas possa conter níveis notadamente mais elevados do que o mostrado na tabela. Para comparação, a radioatividade média de crosta da Terra é de cerca de 1400 Bq / kg, sendo mais da metade devido ao K-40.

As concentrações de radionuclídeos reportadas são dignas de nota. O carvão dos EUA, Austrália, Índia e Reino Unido pode conter até cerca de 4 ppm de urânio, na Alemanha até 13 ppm, e o carvão do Brasil e da China podem ir até 20 ppm de urânio. As concentrações de tório são, muitas vezes, cerca de três vezes superiores aos dos urânio.

Durante a combustão os radionuclídeos são retidos e concentrados na cinza volante (*flyash*) e na cinza de fundo (*botton ash*), sendo a maior concentração encontrada na cinza volante. A concentração de urânio e tório na cinza de fundo e volante pode ser até dez vezes maiores do que a do carvão queimado, enquanto outros radionuclídeos, como Pb-210 e K-40 podem se concentrar em um grau ainda maior na cinza volante. Embora muita cinza volante seja enterrada em uma barragem de cinzas, uma grande parte é utilizada na construção civil. A Tabela 5.2 fornece alguns dados publicados para a radioactividade em cinzas. A presença de radioatividade em cinzas resulta em implicações óbvias para a utilização no concreto.

Em uma usina chinesa movida a carvão, a quantidade de polônio-210 emitida no aerossol a partir de uma pilha de carvão vegetal foi de 257 MBq / GW / ano.

No período 2012-13, a Austrália exportou 336 milhões de toneladas de carvão. Com uma média de 0,9 ppm de urânio e 2,6 ppm de tório. Traduzindo: podemos dizer que, pelo

Tabela 5. 1 Atividades dos radionuclídeos NORM no carvão (Bq/kg) (IAEA, 2003), (IAEA, 2015)

País	U-238	Ra-226	Pb-210	Po-210	Th-232	Ra-228	K-40
Austrália	8,5-47	19-24	20-33	16-28	11-69	11-64	23-140
Brasil	72	72	72		62	62	
China		10-25 e máx 5.600			10-25 e máx 29.000		
Alemanha		10-145 média 32			10-63 média 21		10-700 média 225
(lignite)		0-58			0-58		4-220
Grécia (lignite)	117-390	44-206	59-205			9-41	
Hungria	20-480					12-97	30-384
Polônia	Máx 159 média 18					Max 123 média 1	Máx. 785
Romênia	≤ 415, média 80	≤ 557, média 126	≤ 510, média 210	≤ 580, média 262	≤ 170, média 62		
Reino Unido	7-19	8-22			7-19		
EUA	6-73	8.9-59	12-78	3-52	4-21		

Tabela 5. 2 Atividade de radionuclídeos NORM em cinzas e escória (IAEA, 2003).

	Série do U, Ra-226	Série do Th	K-40
Hungria	200-2.000	20-300	300-800
EUA	100-600	30-300	100-1.200
Alemanha cinzas	6-166	3-120	125-742
Alemanha escória	68-245	76-170	337-1240
Australia (U média 0,9 ppp e Th média 2,6 ppm		Total: 2630	
Austrália: NSW		Total: 3200	

menos, 300 toneladas de urânio e 870 toneladas de tório poderiam ser facilmente adicionados aos números de exportação publicados.

Nos EUA, 858 milhões de toneladas de carvão foram utilizados para a produção de eletricidade em 2013. Com um teor médio de 1,3 ppm de urânio e tório 3,2 ppm, a geração de eletricidade a carvão nos EUA, neste ano, deu origem a 1.100 toneladas de urânio e 2.700 toneladas de tório em cinzas de carvão. Em Victoria, Austrália, cerca de 65 milhões de toneladas de carvão marrom é queimada anualmente para a produção de eletricidade. Este contém cerca de 1,6 ppm de urânio e tório 3,0-3,5 ppm, portanto, cerca de 100 toneladas de urânio e 200 toneladas de tório é enterrado em aterros sanitários a cada ano no Vale do Latrobe.

É evidente que mesmo com 1 parte por milhão (ppm) de U em carvão, há mais energia contida no urânio (se fosse para ser utilizado em um reator de neutrons rápidos) do que no próprio carvão. Se o carvão contém 25 ppm de urânio e, este

urânio fosse utilizado simplesmente em um reator convencional, seria possível produzir metade da energia térmica, com o carvão.

Com o aumento dos preços do urânio as cinzas contendo urânio tornam-se economicamente significativas. Nos anos 60 e 70 (século 20), foram recuperadas cerca de 1.100 toneladas de urânio a partir de cinzas de carvão nos EUA. A viabilidade econômica depende do grau e da composição das cinzas - o alto consumo de ácido torna a recuperação não rentável.

Em 2007, a China National Nuclear Corp (CNNC) encomendou para Sparton Recursos http://www.spartonres.ca do Canadá em conjunto com o Instituto de Testes No.5 de Beijing, a realização de ensaios avançados em lixiviação de urânio a partir de cinzas de carvão no centro de Yunnan. No início de 2007, Sparton assinou um acordo com a Xiaolongtang Guodian Companhia de Energia de Yunnan para um programa de testes, e eventualmente, comercialização de extração do urânio dos resíduos de cinzas de carvão. Cerca de 250 km ao sudoeste de Kunming, as centrais de Xiaolongtang, Dalongtang e Kaiyuan, todas localizadas a uma diostancia de cerca de 20 km uma das outras, queimam carvão de uma mina de lignite a céu aberto com localização central, produzindo um teor elevado de cinzas (20-30%) e teor muito elevado de urânio. O teor de urânio no carvão varia de cerca de 20 a 315 ppm com média de cerca de 65 ppm. As concentrações médias nas cinzas são de 210 ppm U (0,021% U) – valor acima do nível de corte de algumas minas de urânio.

A empresa de joint venture, Yunnan Sparton New Environ-Tech Consulting Co (SNET) foi criada para operar “os programas de recuperação de urânio secundários em Yunnan”, nomeadamente, em Lincang, mas nenhuma recuperação comercial de urânio foi relatado. A Sparton também tinha um acordo para extrair urânio de cinzas de carvão, após a recuperação de germânio nas bacias Bangmai e Mengwang em Yunnan. Esta cinza

varia de 150 a mais de 4000 ppm U (0,40% U), com média de 250 ppm U (0,025%). A Sparton teve uma participação de 85% na mina de carvão de germânio e Huajun, mas não é reportado o urânio aqui.

Na África do Sul, o Projeto de Energia de Urânio (Holgoun) foi concebido para investigar a recuperação de urânio a partir do campo de carvão Springbok Flats, com estimativa de conter cerca de 84.000 toneladas de U com percentuais de 0,06 para 0,10% U. O projeto tem como objetivo investigar a viabilidade da mineração do carvão de baixa qualidade, utilizando-o para queimar em uma usina de geração de energia elétrica convencional, e extrair o urânio a partir da cinza residual.

Na Austrália, o Conselho Indígena de Terras NSW, pediu uma licença de exploração de urânio ao longo de quatro grandes barragens de cinzas de carvão adjacente às estações de energia.

Mineração de carvão

A mineração de carvão em si também dá origem a um potencial risco associado ao NORM. O carvão pode ser extraído tanto em poços abertos ou minas subterrâneas, e produz uma quantidade significativa de resíduos de rocha e água de drenagem que podem apresentar níveis elevados de radioatividade. Minas de carvão subterrâneas estão sujeitas ao aumento dos níveis de radônio, enquanto que níveis elevados de rádio e K-40 podem ser encontrados em resíduos rochosos de mineração e solo. Em sedimentos lançados para o meio ambiente em águas residuais têm sido encontrados valores de atividade tão elevadas quanto 55.000 Bq / kg de Ra-226 e 15.000 Bq / kg de Ra-228. (IAEA 2003, Tech Report 419)

Uma pesquisa de 44 minas de carvão chinesas (40 dos quais subterrâneas) indicou que as concentrações de radônio em 15% delas estavam acima de 1000 Bq / m^3 (IAEA 2015).

No Brasil, o nível de concentração de radônio no ar, na mina de carvão subterrânea de Figueira no estado do Paraná, entre os anos de 1999 e 2000, foi determinado como sendo entre 2400 e 6000 Bq/m3, e medidas para mitigação foram adotadas visando à diminuição (Veiga et al., 2004).

A contribuição das emissões atmosféricas oriundas do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (CTJL), localizado no Estado de Santa Catarina, Brasil, no solo superficial das circunvizinhanças do complexo foi estimada por Godoy et. al. (2004). Neste trabalho, os pesquisadores determinaram a concentração média de U (4±2 mg/kg) e Th (13,1±8,4 mg/kg) nos solos e concluíram que as concentrações observadas destes elementos eram normais e não poderiam ser atribuídas às emissões da termelétrica.

Informações adicionais a respeito de outras indústrias em escala mundial podem ser consultadas no link: http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/radiation-and-health/naturally-occurring-radioactive-materials-norm.aspx

Referências Bibliográficas

IAEA, 2003, *Extent of environmental contamination by naturally occurring radioactive material (NORM) and technological options for mitigation* – TRS 419 - Vienna: International Atomic Energy Agency.

IAEA, 2015, *Naturally occurring radioactive material (NORM VII)*: proceedings of the seventh International Symposium on naturally occurring radioactive material, Beijing, China, 22-26 April 2013. — Vienna: Vienna: International Atomic Energy Agency, 2015. NORM VII).

VEIGA et al., 2004 -VEIGA L H S, MELO V, KOIFMAN S and AMARAL E C S *High radon exposure in a Brazilian underground coal mine*, J. Radiol. Prot. 24 (2004) 295–305.

GODOY et. al. 2004 - GODOY M.L.D. P., GODOY J. M.; ROLDÃO L. A.; CONTI L.F. *Application of multivariate statistical analysis to superficial soils around a coal burning power plant*. J. Braz. Chem. Soc. vol.15 no. 1 São Paulo, Jan./Feb. 2004.

5B-2

NORM na Indústria de Óleo e Gás

Luiz Ernesto Santos de Carvalho Matta

Análises de óleo e gás de muitos poços diferentes mostram que os radionuclídeos de meia-vida longa de descendentes das séries do urânio e tório não são mobilizados das formações rochosas onde estão contidos.

No entanto, Ra-226, Ra-224, Ra-228 e Pb-210 são mobilizados, e aparecem, principalmente, na água de produção durante a extração de petróleo e gás. Estes isótopos e seus descendentes radioativos podem, então, precipitar da solução, juntamente com sulfato e depósitos de carbonato, formando incrustações ou borras em tubos e equipamentos. O radônio-222 é o produto de decaimento imediato do rádio-226 e, preferencialmente, segue as linhas de gás. Ele decai (por várias etapas rápidas) para Pb-210, que pode, portanto, agregar-se como uma película fina em equipamentos da linha de extração de gás. Os níveis de radioatividade reportados variam de forma significativa, dependendo da radioatividade do reservatório de óleo e da salinidade da água de produção do poço. Quanto maior for a salinidade, maior a probabilidade de NORM ser mobilizado. Visto que a salinidade, frequentemente, aumenta com a idade de um poço, poços antigos tendem a exibir níveis mais elevados de

NORM que poços mais jovens. A Tabela 7B-1 mostra as faixas de concentrações de radionuclídeos, normalmente, encontradas durante a extração de petróleo e gás.

Tabela 7B-1- Concentração de radionuclídeos na produção de óleo e gás (IAEA, 2003).

Radionu-clídeo	Gás natural Bq/m3	Água produzida Bq/l	Incrustação Bq/kg	Borras Bq/kg
U-238		traços	1-500	5-10
Ra-226		0,002-1.200	100-15x106	50-800.000
Po-210	0,002-0,08		20-1.500	4-160.000
Pb-210	0,005-0,02	0,05-190	20-75.000	10-1,3x106
Rn-222	5-200.000			
Th-232		traços	1-2	2-10
Ra-228		0,3-180	50-2,8x106	500-50.000
Ra-224		0,05-40		

Se a incrustação apresenta uma concentração total de atividade de 30.000 Bq / kg, esta incrustação é considerada contaminada. Isto significa que para a escala de Ra-226 (Ra-226 gera 8 produtos de decaimento e, portanto, são 9 radionuclídeos a serem considerados no total), o nível específico de Ra-226 é de 3300 Bq / kg. Para escala de Pb-210 (Pb-210 gera 2 produtos de decaimento, portanto 3 radionuclídeos devem ser considerados), o nível é de 10.000 Bq / kg. Estes números referem-se à escala, não à massa total de tubos ou outro material.

Para os sistemas de injeção de água do mar surgiu, mais recentemente, um novo tipo de produção de NORM: depósitos

de biopelícula, que fixa quantidades significativas de urânio da água do mar.

O fraturamento hidráulico (Fracking) para a produção de gás libera quantidades significativas de radionuclídeos naturais em alguns ambientes geológicos, tanto em cortes de perfuração e água.

No xisto da US Marcellus na Pensilvânia, Nova York e West Virginia (xisto preto), a concentração de atividade é tipicamente de cerca de 370 Bq kg, incluindo altos níveis de rádio-226, sendo 625 Bq/L em salmoura e até 66 Bq/l na água que retorna superfície. Valores reportados para salmoura são da ordem de 377 Bq/L para Ra-226 e 46 Bq/L para Ra-228 (USGS, 1999). Outros relatórios relacionados com águas residuais aqui comparadas com os valores de água potável (0.185 Bq / L), mostram valores de cerca de 300 vezes os limites US NRC para descarga de águas residuais industriais (1995, USEPA).

NORM na indústria de petróleo e gás representa um problema para os trabalhadores, particularmente, durante a manutenção, transporte de resíduos, processamento e desativação (descomissionamento). Em particular, Pb-210 que gera depósitos de filmes, e é um emissor beta, é uma preocupação apenas quando as áreas internas dos tubos ficam expostas. A exposição externa devido ao NORM na indústria de petróleo e gás é, geralmente, baixa o suficiente para não exigir medidas adicionais de proteção, de modo a garantir que os trabalhadores permaneçam expostos a níveis inferiores ao limite de dose anual, tal como estabelecido pelas normas básicas da IAEA – Basic Safety Standards. As exposições internas podem ser minimizadas com práticas de higiene no ambiente de trabalho, como lavar as mãos e ferramentas, usar máscaras em algumas áreas, etc.

No Brasil, as exposições ocupacionais foram mais profundamente estudadas, a partir de um trabalho de pesquisa desenvolvido por (MATTA,2000), no Instituto de Radioproteção e Dosimetria, apoiado pela companhia petrolífera brasileira PE-

TROBRAS. Decorrente deste trabalho, diversas ações e procedimentos foram implementados nas unidades de E&P, fazendo com que o tema fosse mais amplamente debatido e estudado.

Referências Bibliográficas

IAEA, 2003 - *Radiation protection and the management of radioactive waste in the oil and gas industry*. — Safety Report Series 34 - Vienna: International Atomic Energy Agency.

USEPA, 1995 - US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Management of Water Treatment Plant Residuals, Rep. EPA/625/R-95-008, USEPA, Washington, DC (1995).

IAEA, 2014 - *Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards*. — Vienna: International Atomic Energy Agency, 2014. p.; 24. — (IAEA safety standards series, ISSN 1020–525X; no. GSR Part 3)

USGS, 1999 – *US GEOLOGICAL SURVEY, Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in Produced Water and Oil-Field Equipment* — An Issue for the Energy Industry, USGS Fact Sheet FS–142–99, USGS, Denver, CO (1999). Disponível em: http://greenwood.cr.usgs.gov/pub/fact-sheets/fs-0142-99/fs-0142-99.pdf. Acessado em: 2016

MATTA, 2000, *Aspectos Radiológicos Ocupacionais Relacionados à Presença de Radionuclídeos Naturais em Estações de Extração e Produção de Petróleo* [Rio de Janeiro] 2000, V, 100p, 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Nuclear, 2000, Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

6

Aspectos Legais e Regulatórios em Empresas Mínero-Industriais

Maisa Haiidamus Magalhaes

A Lei 4118, de 27 de agosto de 1962, posteriormente, alterada pelas Leis 6189, de 16/12/74 e 7781, de 27 de junho de 1989, estabelece a competência da CNEN na área nuclear. Sob a ótica do setor mineral, os seguintes tópicos são aplicáveis:

1) baixar diretrizes específicas para radioproteção e segurança nuclear;
2) expedir regulamentos e normas de segurança e proteção relativas ao manuseio de materiais nucleares, comercialização de material nuclear, minérios nucleares e concentrados que contenham elementos nucleares;
3) fiscalizar a industrialização de minérios nucleares, a produção e o comércio de materiais nucleares, sendo que as operações de compra, venda, importação, exportação, empréstimo, cessão e arrendamento só poderão ser exercidas sob a licença e fiscalização da CNEN; e
4) expedir normas, licenças e autorizações relativas a:

a) instalações nucleares;
b) posse, uso, armazenamento e transporte de material nuclear.

Essa mesma legislação estabelece que o urânio, o tório e o plutônio são elementos que devem ser considerados nucleares.

Quando a ocorrência de U ou Th for em quantidade de valor econômico superior ao da substância mineral pesquisada ou lavrada, a jazida será incluída no monopólio e a instalação de extração e beneficiamento será classificada como instalação nuclear.

Cabe aqui observar que, durante décadas, as instalações contendo minérios e matérias-primas com U e Th associados só eram controladas sob o ponto de vista do comércio mineral, não tendo sido contemplados os aspectos de segurança e proteção radiológica. Entre outras dificuldades, havia o entendimento jurídico à época que somente instalações nucleares estavam sujeitas ao processo de licenciamento e, se as instalações mínero-industriais fossem consideradas nucleares, deveriam ser estatizadas, em função do exercício do monopólio da União.

Nos anos 90, foi feita uma consulta à Procuradoria da CNEN relacionada à sua competência em licenciar e fiscalizar empresas de mineração, sob o ponto de vista de segurança e proteção radiológica, em função da presença de urânio e tório nos minérios lavrados e de acordo com o Parecer Técnico PJU 035/92, da CNEN:

> "Não está na competência da CNEN autorizar ou licenciar o funcionamento de mineradoras que operam com U e Th, salvo se forem classificadas como instalações nucleares."
>
> "A CNEN pode e deve fiscalizar o cumprimento de suas normas, inclusive, as relacionadas com a radiopro-

teção, posto que o poder-dever de fiscalizar está ínsito no poder de polícia que detém para estabelecer as referidas normas".

Assim, de acordo com entendimento jurídico à época, a CNEN não poderia licenciar as empresas de mineração que não fossem classificadas como instalações nucleares, mas deveria fiscalizar o cumprimento de suas normas, estando aí incluídas as diretrizes básicas de proteção radiológica.

Em 2004, foi aprovada a Norma CNEN-NN-4.01 "Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Instalações Mínero-Industriais", por meio da Resolução CNEN Nº 028, de 17 de dezembro de 2004, na qual não ficou regulamentado o processo de licenciamento, envolvendo atos como aprovação do local, licença de construção, autorização para operação, etc., mas foi estabelecido um processo de certificação, pela CNEN, do atendimento, pelas empresas de mineração, aos requisitos de segurança e proteção radiológica pertinentes à atividade de mineração e beneficiamento de minérios com U e Th associados.

Mais recentemente, de acordo com o Despacho PF-CNEN no 120/08, de 25 de setembro de 2008, a Procuradoria Federal apresentou outro entendimento jurídico, qual seja, as instalações de extração ou beneficiamento de minério que não se enquadrem na definição de instalação nuclear, nos termos do art. 5º da mesma lei (ou seja, se a ocorrência de urânio ou tório for, em quantidade, de valor econômico inferior ao da substância mineral pesquisada ou lavrada), devem ter licença ou autorização para a posse e o armazenamento do minério nuclear extraído. A pesquisa e a lavra desses minérios são concedidas nos termos do Código de Mineração, ficando o titular da pesquisa ou da lavra obrigado a comunicar a ocorrência de elementos nucleares.

Seguindo essa nova interpretação jurídica, a Norma CNEN -NN-4.01 deve ser revisada, de modo a transformar o processo

de certificação, com menor peso normativo, em processo de licenciamento.

A Constituição Federal fixa normas, nos termos dos incisos III, VI e VII do **caput** e do parágrafo único, de seu art. 23, para a cooperação entre a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios nas ações administrativas decorrentes do exercício da competência comum relativas à proteção das paisagens naturais notáveis, à proteção do meio ambiente, ao combate à poluição em qualquer de suas formas e à preservação das florestas, da fauna e da flora; e altera a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981.

Em 2011, foi aprovada a Lei Complementar n.º 140/11 que cumpriu o disposto no art. 23, parágrafo único da Constituição Federal de 1988 e regulamentou a competência comum entre União, Estados e Municípios para proteção do meio ambiente, com a finalidade básica de proteger, defender e conservar o meio ambiente ecologicamente equilibrado por meio de uma gestão descentralizada, democrática e eficiente.

DAS AÇÕES DE COOPERAÇÃO no seu Art. 6º: "As ações de cooperação entre a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios deverão ser desenvolvidas de modo a atingir os objetivos previstos no art. 3º e a garantir o desenvolvimento sustentável, harmonizando e integrando todas as políticas governamentais". E no Art. 7º: "São estabelecidas ações administrativas da União:

XIV- promover o licenciamento ambiental de empreendimentos e atividades:

g) destinados a pesquisar, lavrar, produzir, beneficiar, transportar, armazenar e dispor material radioativo, em qualquer estágio, ou que utilizem energia nuclear em qualquer de suas formas e aplicações, ***mediante parecer da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEM).***

A lei complementar, contudo, não consegue, por ela mesma, evitar essa sobreposição, isto é, a duplicidade ou até a intervenção tríplice, como se vê em matérias. Dessa forma, enquanto não vier uma lei adequada para a matéria aludida, não pode vigorar o art. 13, caput, com a licença ambiental ou a autorização ambiental somente por um único ente federativo, pelo menos, no que concerne às matérias em que a delineação das atribuições administrativas não foi feita (Machado, 2013).

A Lei Complementar n.º 140/2011 estabelece também a competência fiscalizatória dos entes federativos, permanecendo a atribuição comum de todos estes entes para a adoção de medidas urgentes para se evitar o dano ambiental, embora a competência para lavrar auto de infração e o procedimento administrativo seja do órgão licenciador.

A competência para licenciamento ambiental dos entes federativos foi mantido o critério da abrangência do impacto: se local, cabe aos municípios; se extrapola mais de um município dentro de um mesmo estado, cabe a este o licenciamento e se ultrapassa as fronteiras do estado ou do país cabe ao órgão federal específico.

De acordo com entendimento de Machado (2013), as atividades de fiscalização e licenciamento compreendidas na competência comum para a proteção do meio ambiente, não vincula uma à outra sem nenhuma subordinação. A competência é comum para proteger o meio ambiente, não estando a fiscalização, entretanto, limitada às atribuições de licenciamento. Esta limitação importaria na redução da competência comum, o que afrontaria a Constituição Federal.

A limitação possível seria apenas no sentido de regulamentar a atuação, informar como se dá a cooperação e o trabalho comum dos diversos entes. Ou seja, a regulamentação da competência comum não pode ser feito com a redução da competência comum. Somente a Constituição poderia impor

qualquer redução da competência comum ou dispor de forma diversa.

Por essa razão, não se deve confundir a competência para fiscalizar com a competência para licenciar, pois na presença de um dano ambiental, o ente que primeiro tomar conhecimento deverá exercer as atividades atinentes à polícia ambiental fiscalizadora. (Machado, 2013)

7

Considerações sobre legislação, transporte e comércio internacional de commodities minerais contendo NORM

Dejanira da Costa Lauria
Flávia Luiza Soares Borges
Raul Alberto Sodre Villegas

De modo geral, os bens minerais podem ser agrupados em três categorias: Metálicos, Não-Metálicos e Agrominerais. No primeiro grupo, estão incluídos o minério de ferro e o aço. Ainda se incluem nesse grupo os metais não-ferrosos, tais como: cobre, estanho, zinco, chumbo, platina, alumínio, magnésio, titânio, níquel, nióbio, tântalo, e vanádio[2]. O segundo grupo, dos não-metálicos, compreende minerais como o quartzo e a argila. Por fim, como exemplos do grupo dos agrominerais, podemos citar o fósforo e o potássio (Tabela 1).

A ocorrência de materiais radioativos naturais está fortemente associada aos metais não-ferrosos, cujo comércio internacional tem movimentado cerca de 365 bilhões de dólares anualmente, na média de 2010 a 2014. Conforme dados di-

2 Disponível em: http://www.cimm.com.br/portal/verbetes/exibir/1506-metais-nao-ferrosos.

Tabela 1. Categorias de minerais e produtos associados.

Categorias dos minerais		Exemplos
Metálicos	Ferrosos	Ferro, aço.
	Não-ferrosos	Cobre, estanho, zinco, chumbo, platina, alumínio, magnésio, titânio, níquel, nióbio, tântalo, vanádio e ouro.
Não-metálicos		Quartzo, argila e calcário.

vulgados pela Organização Mundial do Comércio[3], o Brasil tem uma pequena participação no mercado dessas commodities, sendo responsável por menos de um por cento do valor total das exportações mundiais, desde 2010.

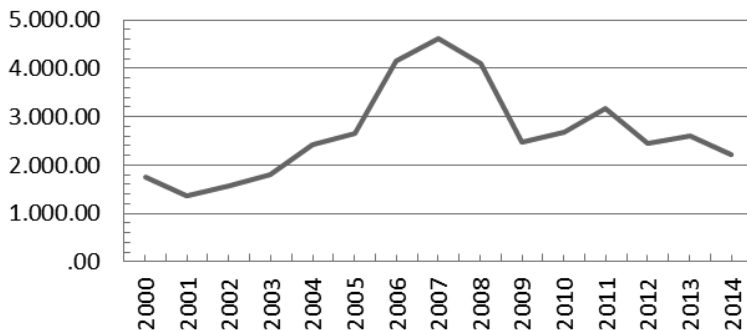



Figura 1. Exportações brasileiras de metais não ferrosos (em milhões de dólares)

Fonte: OMC.

3 Organização Mundial do Comércio. Disponível em: https://www.wto.org/english/res_e/statis_e/statis_bis_e.htm?solution=WTO&path=/Dashboards/MAPS&file=Map.wcdf&bookmarkState={%22impl%22:%22client%22,%22params%22:{%22langParam%22:%22en%22}}

Entretanto, se estratificarmos por tipo de minério, é possível perceber que o Brasil tem grande relevância neste segmento. O Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) define o Brasil como um *global player* de Nióbio, Minério de Ferro, Manganês, Tantalita, Grafite, Bauxita e Rochas Ornamentais. É também exportador de Níquel, Magnesita, Caulim e Estanho, conforme representado na fig 2.

Exportador Global *Player*	Exportador	Auto-Suficiente	Importador/ Produtor	Dependência Externa
Nióbio (1º) Min.Ferro(3º) Manganês (5º) Tantalita (2º)	Níquel Magnésio Caulim Estanho	Calcário Diamante Indust. Titânio	Cobre Enxofre	Carvão Metalúrgico Potássio
Grafite (3º) Bauxita (3º) Rochas Ornamentais (4º)	Vermiculita Cromo Ouro	Tungstênio Talco	Fosfato Diatomito Zinco	Terras Raras

Minerais Estratégicos

Figura 2. Comércio exterior brasileiro de bens minerais.

Fonte: IBRAM. Publicado pelo Centro de Estudos e Debates Estratégicos da Câmara dos Deputados, em 2014.

Entre os minerais considerados estratégicos, quais sejam, aqueles em que o Brasil tem uma grande participação no comércio ou aqueles dos quais depende do fornecimento externo, constam minérios cuja ocorrência está associada a isótopos radioativos naturais. Conforme apresentado no Capítulo 5, é comum encontrarmos urânio ou tório associados ao nióbio, à tantalita, e às terras raras, entre outros. Se avaliarmos a pauta

de exportação, como um todo, também podemos incluir nesse grupo o titânio, cobre e estanho.

A presença de minerais radioativos nos minérios pode ensejar algumas medidas de proteção radiológica, para assegurar que esses minérios não ofereçam riscos aos trabalhadores, meio ambiente e indivíduos do público. Com esta finalidade, a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) publica algumas recomendações em matéria de comércio e transporte de minérios contendo NORM. As recomendações, além de garantirem a segurança das práticas em situações de exposição existente também estabelecem critérios, que, caso adotados, impediriam a implantação de normas de segurança como barreiras não tarifárias ao comércio internacional. Contudo, cada país tem autonomia para estabelecer os requisitos de segurança relativos à proteção radiológica e ao transporte de materiais radioativos e é imprescindível que o exportador conheça e atenda às normas do país de destino.

O objetivo deste capítulo é apresentar os requisitos de proteção radiológica e de transporte dos principais países importadores dos minérios brasileiros cuja ocorrência está associada a minérios radioativos. Assim, serão apresentadas as referências e um panorama da formulação dos requisitos de segurança e dos guias, normas e regulamentos afetos a NORM no que tange aos limites para o público e trabalhadores, valores de isenção nas recomendações da Agência Internacional de Energia Atômica e as legislações dos principais importadores de bens minerais brasileiros: China, União Europeia e Estados Unidos.

1. Organismos e Regulamentos de Radioproteção

Para a formulação da legislação na área de nuclear e radioativa, três organizações são as principais indutoras: UNSCEAR (Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos

da Radiação Atômica), ICRP (Comissão Internacional de Proteção Radiológica) e IAEA (Agência Internacional de Energia Atômica).

O UNSCEAR foi criado pela Assembleia Geral das Nações Unidas em 1955. O seu mandato no sistema das Nações Unidas é para avaliar e relatar os níveis e os efeitos da exposição à radiação ionizante (UNSCEAR, 2006). Este comitê é a autoridade pública internacional sobre os níveis e os efeitos da radiação ionizante usada para fins pacíficos, bem como para fins militares, provenientes de fontes naturais ou de fontes produzidas pelo homem. O seu papel principal é induzir a produção e compilar e avaliar dados e fomentar estudos que servem de base para as recomendações.

Desde 1928, quando foi iniciada a regulamentação de atividades com fontes radioativas, os vários países seguem as recomendações da Comissão Internacional de Proteção Radiológica, a ICRP, Internacional Commission for Radiological Protection. A ICRP é uma comissão de cientistas independente, da qual fazem parte cientistas de diversos países. É uma organização que promove estudos e fóruns de discussões sobre assuntos específicos e emite recomendações, não tendo autoridade para regulamentar, no entanto suas recomendações influenciam os regulamentos e as normas do mundo todo.

A Agência Internacional de Energia Atômica, International Agency of Atomic Energy (IAEA) publica normas (ou padrões), muitas das quais baseadas nas recomendações do ICRP. A IAEA tem a função de estabelecer normas de segurança e prover a aplicação destas normas. As normas recomendadas pela agência não são de atendimento obrigatório, no entanto, os países signatários da IAEA tem obrigação de adotá-las. O Brasil é signatário da IAEA.

As publicações da IAEA desencadearam em vários países discussões e ações visando regulamentar NORM. Esforços consideráveis vêm sendo feitos no mundo inteiro para identificar e

quantificar os riscos radiológicos para os indivíduos expostos nas diferentes indústrias. E nas diferentes nações a legislação tem sido revisada, atualizada e implementada com o objetivo de introduzir medidas de proteção para o trabalhador e para o ambiente.

1.1. A regulamentação em NORM

A partir dos anos 90, foi iniciado um processo em grande escala de identificação e regulamentação das atividades NORM. O novo quadro jurídico resultou em desafios para as indústrias não nucleares que processam, manipulam, ou lidam com fontes de radiação natural. Além da legislação para poluentes convencionais, estas indústrias passaram a ter que lidar com aspectos da legislação nuclear, ambas englobando trabalhadores e ambiente. Era evidente que a partir dos novos requisitos o controle regulatório deveria ser também estendido para os resíduos produzidos. Algumas indústrias convencionais foram, portanto, confrontadas com um novo tipo de controle regulatório, afetando suas instalações de produção e políticas de gestão de resíduos.

Atualmente, reconhece-se que a falta anterior de regulamentação, ou a regulação inadequada, levou à exposição humana desnecessária, a danos ambientais e a grandes prejuízos econômicos (Chen et al., 2003; Lauria e Rochedo, 2005; Hurst, 2010). Com a experiência, aprendeu-se que a melhor maneira para lidar com a licença de uma atividade NORM é englobar todo o ciclo de vida da instalação, de modo a garantir que as melhores práticas serão adotadas, desde a fase de exploração até a de encerramento. É muito importante que todos os impactos sejam considerados e minimizados e que uma avaliação realista dos custos envolvidos para aderir à legislação ambiental seja realizada (Reis e Lauria 2014).

1.1.1. Agência Internacional de Energia Atômica

Enquanto a preocupação sobre o impacto ambiental causado pelas indústrias convencionais teve início nos anos 60, a partir do qual a legislação ambiental foi se tornando mais severa, a preocupação com a radioatividade começou mais tarde. O sistema de proteção radiológica incluiu os radionuclídeos naturais desde meados dos anos 80 (ICRP, 1984), mas apenas após a publicação do ICRP 60, na qual algumas recomendações sobre a proteção humana contra a radiação advinda de fontes naturais foram incorporadas, os requisitos para indústrias NORM começaram a serem discutidos (ICRP, 1990). Em seguida, a Agência Internacional de Energia Atômica junto com a FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), a Organização Internacional do trabalho (ILO), a Organização Pan Americana de Saúde (PAHO) e a WHO (World Health Organization) publicaram o Basic Safety Standards No. 115, (IAEA, 1996). Neste documento, os limites para isenção de radionuclídeos naturais foram estabelecidos. A partir da publicação do BSS, várias legislações e requisitos relacionados a NORM foram desenvolvidos em vários países.

O BSS 1996 foi atualizado em um novo documento sobre Requisitos de Segurança “Proteção Radiológica e Segurança das Fontes de Radiação: Normas Internacionais de Segurança de Básicas” e foi publicado como Requisitos Gerais de Segurança Parte 3, No. GSR Part 3, em julho de 2014. O novo BSS (2014) inclui explicitamente NORM, o que é benéfico para a regulação das indústrias NORM mundialmente.

São os seguintes os valores preconizados pelo GRS para isenção (Tabela 2).

Os valores são válidos para os radionuclídeos das séries naturais em equilíbrio secular; isto é, as séries encabeçadas por ^{238}U, ^{235}U ou ^{232}Th, o valor é aplicado ao pai da série. Os valores podem ser aplicados individualmente para cada componente

Tabela 2. Valores estabelecidos pela IAEA para isenção de material sólido contendo radionuclídeos naturais.

Substâncias radioativas que não excedam os níveis de isenção:
• Série do Th= 1 Bq/g para qualquer dos radionuclídeos • Série do U= 1 Bq/g para qualquer dos radionuclídeos • 40K < 10 Bq/g

da série, ou para o líder do subconjunto, como, por exemplo, o ^{226}Ra, ou ^{210}Pb.

- Para a isenção do material, as quantidades em massa do material a ser liberado de requisitos de segurança devem ser consideradas caso a caso. Entretanto, o critério de dose de 1 mSv por ano deve ser adotado.

Deste modo, se as concentrações de radionuclídeos excederem os limites de isenção (tabela 2), os requisitos para situações de exposição planejadas são aplicados às atividades NORM. Sendo o limite de dose para o público de 1 $mSv.ano^{-1}$, que deve ser otimizado. Para trabalhadores, o limite de dose é 20 $mSv.ano^{-1}$, que deve também ser otimizado. O nível de referência para radônio em ambiente de trabalho é de 1000 $Bq.m^{-3}$.

No GRS, também está reportado o limite de dose de 1$mSv.ano^{-1}$, para situações de exposição a radionuclídeos de origem natural em commodities, incluindo alimentos, rações, água potável, fertilizantes agrícolas, corretivos de solo e material de construção.

1.1.2 Comunidade Europeia

Na Europa, a Comissão Europeia (EC) emite recomendações a serem seguidas pelos membros desta comunidade. A Diretiva 2013/59/Euratom, do Conselho de 5 de dezembro de 2013, fixa as normas de segurança de base relativas à proteção contra os perigos resultantes da exposição a radiações ionizantes, e revoga as diretivas mais antigas. Estabelecem diretrizes e princípios de normas básicas de segurança, visando proteger a saúde de trabalhadores e do público dos perigos da radiação ionizante decorrentes da indústria nuclear e não nuclear. A diretiva abrange todas as situações de exposição e todas as categorias de exposição, a saber, a exposição profissional, a exposição da população e a exposição médica.

As indústrias NORM estão englobadas no âmbito desta diretiva, pois fazem parte do se escopo:

- Atividades humanas que envolvam a presença de fontes de radiação natural conducentes a um aumento significativo da exposição dos trabalhadores ou de elementos da população, em especial, ao tratamento de materiais que contêm radionuclídeos naturais;
- À exposição de trabalhadores ou de elementos da população ao radônio no interior dos edifícios, à exposição exterior às radiações provenientes de materiais de construção.

Não está incluído no escopo da diretiva;

- À exposição à superfície a radionuclídeos presentes na crosta terrestre não alterada.

A Diretiva estabelece requisitos legais para os países-membros para isentar atividades com materiais sólidos conten-

do radionuclídeos naturais. Nesta publicação, os mesmos níveis de referência do GRS, Parte 3 (tabela 2), são recomendados para identificar atividades que necessitam controle.

Esta diretiva preconiza que as indústrias NORM devem cumprir os mesmos requisitos que as demais práticas. Entendendo-se como prática qualquer atividade humana que possa vir acarretar o aumento na exposição de indivíduos à radiação decorrente de uma fonte de radiação e é manejada como uma situação de exposição planejada.

- Em vez de ser abordada em um título específico, a proteção contra as fontes de radiação natural deverá fazer parte integrante dos requisitos gerais. Em particular, os setores de atividade que processam materiais que contêm radionuclídeos naturais deverão ser geridos no mesmo quadro regulamentar que as restantes práticas.
- Os Estados-membros asseguram que para a liberação de materiais que contenham radionuclídeos naturais, e sempre que estes resultem de práticas autorizadas em que os radionuclídeos naturais são processados em razão das suas propriedades radioativas, cindíveis ou férteis, os níveis de liberação respeitem os critérios de dose aplicáveis para a liberação dos materiais que contêm radionuclídeos artificiais.

A exposição de trabalhadores deve seguir o sistema de classificação mostrado na tabela 3.

Para membros do público, a diretiva recomenda que as doses devido a práticas e às práticas existentes NORM, resultantes de atividades do passado, sejam mantidas o mais baixo possível, considerando o princípio ALARA. O limite de dose é de 1 $mSv.ano^{-1}$, mas valores inferiores ao limite de referência de 0.3 mSv ano^{-1}devem ser buscados.

Tabela 3. Sistema de classificação para exposição de trabalhadores.

Banda	Requisitos	Dose efetiva ($mSv.ano^{-1}$)
Banda 1	Sem necessidade de regulamentação	<1
Banda 2	Baixo nível de regulamentação	1-6
Banda 3	Alto nível de regulamentação	6-20
Banda 4	Situação de excepcionalidade	>20<50 desde que a média em 5 anos ≤20 mSv

Para radônio em local de trabalho e em imóveis residenciais, o nível de referência para a concentração de atividade média anual no ar não deve exceder 300 Bq m^{-3}. Se as médias anuais ultrapassarem estes valores, no caso de locais de trabalho, deve ser feita a notificação. No caso de residências, o estado deve fomentar, por meios técnicos ou outros, ações com o objetivo de reduzir as concentrações.

O nível de referência para água potável é estabelecido na diretiva, Directive 98/83/EC, é de 0,1 $mSv.ano^{-1}$.

1.1.2 Legislação sobre Material de Construção.

A Comunidade Europeia também publicou uma diretiva com recomendações sobre radioatividade presente em material de construção (EC-112, 1999).

Esta Diretiva se baseia nas seguintes premissas: o conteúdo de ^{226}Ra no material deve ser tal que não contribua com mais de 200 $Bq.m^{-3}$ de ^{222}Rn para o ar do ambiente e o material de construção deve ser isento de controle, se a sua contribuição

para a dose devido à radiação gama não exceder o valor de 0,3 $mSv.ano^{-1}$.

Para simplificar a avaliação de dose e subsidiar a tomada de decisão com respeito às restrições de uso de material de construção, a diretiva apresenta o Index de Concentração de Atividade (ICA) para ser utilizado como uma varredura, de uma maneira prática. Este índice deve considerar o modo de uso e as quantidades usadas do material nas construções e imóveis.

O cálculo do ICA é realizado de acordo com a equação 1.

$$ICA = \frac{C_{K-40}}{3000} + \frac{C_{Ra-226}}{300} + \frac{C_{Ra-228\ (Th-232)}}{200} \qquad \textbf{equação 1}$$

Onde $C_{K\text{-}40}$, $C_{Ra\text{-}226}$ e $C_{Ra\text{-}228}$ são as concentrações no material de construção de ^{40}K, ^{226}Ra e ^{228}Ra, respectivamente, em $Bq.kg^{-1}$.

O índice de concentração de atividade não deve exceder os valores apresentados na Tabela 4, dependendo do critério de dose adotado e da forma e quantidade em que o material é usado na construção.

Tabela 4. Critérios dos índices de concentração de atividade.

Critério de Dose	0,3 $mSv.ano^{-1}$	1 $mSv.ano^{-1}$
Materiais usados em grandes quantidades. Ex: concreto.	ICA<0,5	ICA<1
Materiais superficiais e com uso restrito. Ex.: telhas, placas divisórias.	ICA<2	ICA<6

A Diretiva estabelece que o ICA deve ser usado como uma ferramenta de avaliação preliminar para identificação de material que deve ser isento ou investigado. Caso o material não atinja os critérios, uma avaliação de dose baseada em cenários onde o material é utilizado deve ser realizada.

O material isento (baseado no critério de dose de 0,3 $mSv.ano^{-1}$) deve entrar no mercado europeu (incluindo importação e exportação dentro da União Europeia) sem restrições relacionadas com radioatividade. No caso de exportação dentro da comunidade europeia, o valor do ICA ou uma declaração de isenção deve ser incluída nas especificações técnicas do material.

2. Estados Unidos da América

A situação atual da legislação sobre NORM nos EUA é complexa, visto que é regulada por várias de leis e entidades. São estas as principais leis, as quais as indústrias NORM estão afeitas: Clean Air Act (indústria de fosfato e mineração de urânio); Clean Water Act (emissões de materiais radioativos outras que as especificadas na lei que classifica material nuclear usado na indústria nuclear, Atomic Energy Act (lei de Energia Atômica), limites de descargas para minas e usinas); Safe Drinking Water Act (nível de contaminante máximo de radiação ionizante e limite de concentração de U em água). Há também subpartes dos regulamentos do programa federal Ionizing Radiation Protection (Proteção da Radiação Ionizante), que tratam especificamente de NORM.

Com respeito às instituições, as indústrias NORM são regulamentadas tanto por agências governamentais federais, tanto por agências estaduais. Dentre as instituições federais, a EPA, Environmental Protection Agency, e NRC, Nuclear Regulatory Comission, são responsáveis pela maior parte da legislação no que diz respeito à radiação. A EPA pronuncia-se na legisla-

Tabela 5. Níveis de radioatividade adotados nos Estados Unidos da América.

Solo: média em 100 m^2, não deve exceder os níveis da radiação de fundo em mais que:	0,2 Bq/g de Ra-226 nos primeiros 15 cm de solo e 0,6 Bq/g nas demais profundidades. Limite operacional para liberação de solo contaminado: 0,2 Bq/g de Ra-226 ou de Ra-228 acima do background.
Radônio em Imóveis	A concentração média dos produtos de decaimento (incluindo a radiação de fundo) não devem ultrapassar 4 $pCi.L^{-1}$ correspondendo a 148 $Bq.m^{-3}$.
Radiação gama em imóveis	Os níveis de radiação gama não devem ser superiores aos níveis de radiação de fundo (background) por mais de 20 micro roentgens por hora (~0.174 $\mu Sv.h^{-1}$).
Água potável	^{226}Ra e ^{228}Ra (Combinados) = 5 pCi/l (0,185 Bq/l); Emissores Alfa total (excluindo Rn e U, mas incluindo ^{226}Ra) = 15 pCi/l (0,555 Bq/l); Emissores beta e fótons = 4mrem/year (0,04 mSv/ano); Urânio = 30 μg/L

ção de radioproteção ambiental. O NRC elabora normas como parte de sua função de regulamentar fontes de radiação nucleares civis. Ainda o DOE, Department of Energy, tem elaborado normas para público e trabalhadores aplicáveis nos locais de suas instalações nucleares (www.tenorm.com).

Para fontes de radiação feitas pelo homem, os limites de dose anual para os membros do público são de 1 mSv (100

mrem) para exposições contínuas e 5 mSv (500 mrem) para as exposições esporádicas. De acordo com o princípio ALARA, a restrição de dose aplicada a uma única fonte é 0,25 $mSv.ano^{-1}$ (NCRP, 1993).

O limite de dose efetiva anual para trabalhadores é de 50 mSv e o limite de dose efetiva acumulativo é de 10 mSv x idade (anos). O limite para ^{222}Rn é especificado no documento 10 CFR 20 como 1E-7 $\mu Ci.ml^{-1}$ ou 100 $pCi.L^{-1}$.

O material classificado como nuclear pela NRC é aquele que contenha U e Th em qualquer forma física ou química, ou nos minerais originais, em concentrações superiores a 0,05% de U, ou a 0,05% de Th ou a 0,05 % de U e Th (a soma dos dois) (AEC,1972). Apenas para efeito de entendimento: 0,05% de U= 500 ppm =6 Bq/g.

Os níveis de radioatividade adotados, atualmente nos EUA para contaminação de superfície e radônio em imóveis e água potável estão reportados na tabela 5 (EPA 1978, USEPA 2000).

Vários estados americanos também regulam alguns tópicos específicos relacionados à NORM, no site www.tenorm.com uma relação das leis estaduais podem ser encontradas.

3. República Popular da China

Na China, a hierarquia legislativa estabelece a primazia das leis seguidas pelas regulações do Conselho de Estado, regras de departamento e, por fim, normas, guias e documentos técnicos. A Lei de Prevenção e Controle da Poluição Radioativa, promulgada em 2003, tem como objetivo a prevenção e controle de poluição ambiental. A lei se aplica, entre outros, a instalações nucleares, mineração de urânio/tório e mineração com radionuclídeos associados e delega ao Ministério de Proteção Ambiental a responsabilidade de controlar e fiscalizar as indústrias NORM, no que tange à proteção radiológica e ambiental. As agências de

proteção ambiental locais são as instituições responsáveis pelo licenciamento e fiscalização das minerações, cujo minério apresente concentrações elevadas de radionuclídeos naturais.

A norma GB 18871-2002, Princípios Básicos de Proteção contra Radiações Ionizantes e para a Segurança de Fontes Radioativas, é o pilar da estrutura de proteção radiológica e estabelece que as práticas que abrangem fontes naturais devem ser controladas, caso não atendam aos critérios de isenção. Conforme a norma básica, o critério de isenção aplicável aos minérios, produtos intermédios, resíduos ou rejeitos é de 1 $Bq.g^{-1}$ para cada radionuclídeo da cadeia de decaimento do urânio e do tório. As instalações que não atendem ao critério de isenção devem submeter um relatório de avaliação de impacto ambiental ao órgão responsável, antes mesmo do início das operações, como disposto no Capítulo V da Lei de Prevenção e Controle da Poluição Radioativa. Na fase operacional, as instalações devem elaborar e executar plano de monitoração, que também deve ser apresentado ao órgão ambiental.

Além da norma GB 18871-2002, o arcabouço normativo relativo às práticas e produtos associados a fontes naturais inclui outras regras, tendo em vista a necessidade de proteção do indivíduo do público, do trabalhador e do meio ambiente. Dentre estas, destacam-se as seguintes normas:

- GB 14500-2002 – Regulação para gerência de rejeitos radioativos
- GB 6566-2010 – Limites de radionuclídeos em materiais de construção
- Regras de inspeção de radioatividade para importação de minerais

No que tange à exposição ocupacional e de indivíduo do público, os limites estabelecidos nas normas chinesas estão alinhados aos limites recomendados pela AIEA. Para exposições

ocupacionais é adotado como limite a média de 20 mSv por ano, em média de cinco anos, desde que não ultrapasse 50 mSv em um único ano. Para indivíduos do público, o limite anual de dose efetiva é de 1 mSv.

3.1. Legislação sobre Material de Construção.

Para materiais de construção, a norma GB 6566-2010- “Limites de radionuclídeos em materiais de construção”, estabelece dois índices para classificação dos materiais. O índice de exposição interna é definido como a razão entre a atividade específica do ^{226}Ra nos materiais e o limite estabelecido na norma. Para exposição externa, além do ^{226}Ra, a norma também considera a contribuição dos radionuclídeos ^{232}Th e ^{40}K, sendo o índice de exposição externa definido como a razão entre a atividade específica de cada um desses radionuclídeos e o valor limite. Os índices de exposição interna e externa são calculados conforme equações 2 e 3, respectivamente:

$$I_{Ra} = \frac{C_{Ra}}{200} \quad \textbf{equação 2}$$

Em que, C_{Ra} é a concentração de atividade de ^{226}Ra no material de construção e 200 o limite estabelecido na norma, considerando apenas a exposição interna, em $Bq.kg^{-1}$.

$$I_R = \frac{C_{Ra}}{370} + \frac{C_{Th}}{260} + \frac{C_K}{4200} \quad \textbf{equação 3}$$

Onde, C_{Ra}, C_{Th} e C_K são as concentrações de atividade no material de construção e os valores 370, 260 e 4200, são os limites para os radionuclídeos ^{226}Ra, ^{232}Th e ^{40}K, expressos em $Bq.kg^{-1}$.

Os principais materiais de construção, utilizados nas estruturas básicas, não podem apresentar radionuclídeos com concentração de atividade superior aos limites estabelecidos na norma. Para os materiais decorativos, são definidas classes que variam conforme concentração de atividade. Dependendo da concentração de radionuclídeos e do limite definido na norma, os materiais podem ter o uso restrito, como verificado na tabela 6.

Tabela 6: Classificação dos materiais de construção.

Materiais principais	$I_{ra} \leq 1$ e $I_r \leq 1$	Não há restrições.
Material de decoração – classe A	$I_{ra} \leq 1$ e $I_r \leq 1,3$	
Material de decoração – classe B	$I_{ra} \leq 1,3$ e $I_r \leq 1,9$	Não podem ser utilizados em superfícies internas de residências, escolas, hospitais, escritórios, hotéis, etc. Podem ser utilizados em superfícies internas de shoppings, museus, ginásios, etc.
Material de decoração – classe C	$I_r \leq 2,8$	Podem ser utilizados apenas em superfícies externas.

4. Brasil

O IBAMA é o órgão responsável pelo Licenciamento Ambiental de Instalações Nucleares. Existe um convênio entre as duas entidades que visa a compatibilizar as legislações nuclear e ambiental e os procedimentos do exercício do poder que cabe

às duas entidades. Ainda tem por finalidade regular as ações conjuntas quanto ao licenciamento, acompanhamento, fiscalização e controle das não nucleares no que tange à preservação do meio ambiente.

Em relação à regulamentação de NORM no Brasil, a principal referência é a Norma CNEN NN 4.01 - Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Instalações Mínero-Industriais, publicada no Diário Oficial da União, em 26 de maio de 2005. Esta tem por objetivo *estabelecer os requisitos de segurança e proteção radiológica de instalações mínero-industriais que manipulam, processam, bem como armazenam minérios, matérias-primas, estéreis, resíduos, escórias e rejeitos contendo radionuclídeos das séries naturais do urânio e tório, simultaneamente ou em separado, e que possam, a qualquer momento do seu funcionamento ou da sua fase pós-operacional, causar exposições indevidas de indivíduos do público e de trabalhadores à radiação ionizante*.

A Norma 4.01 define um conjunto de Informações Preliminares (IP) que toda operadora deve fornecer à CNEN. São estes, em linhas gerais, o fluxograma simplificado do processo operacional, teores medidos ou estimados de radionuclídeos, capacidade nominal de produção da instalação, estimativa da solubilidade dos radionuclídeos nos rejeitos, descrição das instalações de armazenamento e descrição dos sistemas de deposição de resíduos e rejeitos.

De acordo com a Categoria da instalação, uma série de requisitos a respeito de caracterização de local, proteção radiológica ambiental e ocupacional, gerenciamento de rejeitos, planos de emergências e projetos, dentre vários outros tópicos, devem ser atendidos pelas operadoras. Tais requisitos compõem o Relatório de Análise de Segurança (RAS) ou sua versão simplificada (RASS).

As três categorias definidas na Norma baseiam-se na atividade específica de uma substância radioativa sólida, natural

ou concentrada, que venha a ser processada pela instalação. A classificação é definida de acordo com aquela de maior atividade específica que faz parte do processo produtivo da instalação, sem distinção entre matéria-prima, produto, sub ou coproduto, resíduo ou rejeito. A tabela a seguir apresenta as faixas de atividade para as categorias, bem como as exigências de cada.

Tabela 7. Categorias classificatórias das indústrias NORM no Brasil (CNEN 4.01,2005).

Categoria	Atividade Específica (Bq/g)	Exigência
I	> 500	IP RAS
II	> 10 e ≤ 500	IP RASS
III	≤ 10 **ou** ≥ 1 mSv/ano[1,2]	IP

[1] Dose a qual os trabalhadores são submetidos, em acréscimo à radiação de fundo.

[2] Estão isentas as instalações que processem apenas materiais com atividade específica $\leq$ 10 Bq/g e não submetam os trabalhadores a acréscimo de dose acima de 1 mSv/ano.

A pesquisa, a lavra, o enriquecimento, o reprocessamento, a industrialização e o comércio de minérios e minerais nucleares e seus derivados, com exceção dos radioisótopos para uso medicinal, constituem monopólio da União no país, segundo o artigo 177, da Constituição Federal.

Os minérios que, usualmente, contêm NORM não são classificados como material nuclear, uma vez que não possuem

urânio ou tório como seu principal constituinte e bem mineral. No entanto, a Comissão Nacional de Energia Nuclear, de acordo com a lei citada e também com as leis 4.118/62 e 6.189/74 e as Resoluções CNEN 3/65, 4/69 e 8/77, o exportador de minério que contenha urânio e/ou tório associados, fica obrigado a restituir à União as quantidades desses elementos contidos no minério a ser exportado, quando este contiver mais que 0,05% de U_3O_8 e /ou 0,20% ThO_2.

A CNEN mantém um cadastro de empresas exportadoras de minérios com U e Th associados integrado ao Sistema Integrado de Comércio Exterior (SISCOMEX) do Governo Federal. São exemplos de minérios e derivados que têm a exportação controlada pela CNEN:

- Anatásio;
- Cloreto de cério;
- Cloreto de terras-raras;
- Columbita;
- Ilmenita;
- Monazita;
- Nióbio em formas brutas e resíduos;
- Rutilo;
- Tantalita;
- Zirconita.

A Tabela 8 apresenta um resumo do que foi discutido no capítulo até o momento, no que diz respeito à legislação pertinente a atividades envolvendo NORM.

Ainda que o Brasil não tenha uma classificação ou índice para materiais de construção, no geral, vale a pena ressaltar o caso do fosfogesso. Sendo um grande produtor de ácido fosfórico e fertilizantes fosfatados, inevitavelmente, há a produção e acúmulo de grandes quantidades deste material.

Tabela 8. Panorama das legislações

Entidade	Limite de dose para público (mSv.ano^{-1})	Limite de dose para trabalhador (mSv.ano^{-1})	Isenção (Bq.g^{-1})	Índice para material de construção	Radônio: Nível de investigação em local de trabalho
IAEA	1	20[1]	1 mSv.ano^{-1} $^{232}Th < 1$ $^{238}U < 1$ $^{40}K < 10$	não	1000 Bq/m^3
Comunidade Europeia	1	20[1]	$^{232}Th < 1$ $^{238}U < 1$ $^{40}K < 10$	sim	300 Bq.m^{-3}
EUA	1	50[1]	$^{226}Ra < 0,2$ $^{228}Ra < 0,2$ para solo	não	100 pCi.L^{-1} (corresponde a 3.700 Bq.m^{-3})
China	1	20[1]	5 μSv/h ou $^{238}U < 10$ $^{226}Ra < 10$ $^{232}Th < 10$ $^{40}K < 5$ Total < 15	sim	não
Brasil	1	20[1]	$^{238}U < 10$ $^{226}Ra < 10$ $^{228}Ra < 10$ $^{210}Pb < 10$ $^{232}Th < 1$ $^{40}K < 100$	não	não

[1] Média aritmética em 5 anos consecutivos, desde que não exceda 50 mSv em qualquer ano.

[2] Os valores consideram os radionuclídeos em equilíbrio secular com seus filhos.

[3] Valores para até uma tonelada de material. A isenção para quantidade superior pode requerer consideração particular pela CNEN.

Tendo em vista a possibilidade de utilização deste material na agroindústria, na indústria cimenteira e na construção civil, a CNEN regulamentou o seu uso. Para as duas primeiras citadas, foi estabelecido o nível de dispensa de 1.000 Bq/kg para concentração de atividade de ^{226}Ra ou ^{228}Ra para cada radionuclídeo.

4 Transporte de Material Radioativo

A Agência Internacional de Energia Atômica, entidade pertencente a ONU, tem sido o organismo de referência para fixação de normas no que diz respeito a materiais radioativos e tem servido como base para todos os órgãos regulatórios internacionais fixarem normas e exigências. Ela é a responsável pela regulamentação do transporte internacional de material radioativo. O último documento de uma série relacionada ao transporte de material radioativo, foi publicado em 2012 e intitulado: Requerimentos Específicos de Segurança (Specific Safety Requirements (SSR-6)). Os requisitos estabelecidos no SSR-6 aplicam-se ao transporte de material radioativo por todos os meios terra, água ou no ar.

No SSR-6, entre outros, estão listados os códigos UN associados aos tipos e à descrição apropriada para o material a ser transportado, a classificação do material, os tipos de pacotes para os diferentes tipos de materiais e os critérios e meios de controles de dose para público e trabalhadores. O documento apresenta ainda uma tabela intitulada, Valores Básicos de Radionuclídeos, onde estão listadas as concentrações em atividade por radionuclídeos e o valor máximo para atividade total por remessa para isentar o material de controle radiológico para transporte. Em relação à NORM está estabelecido que os valores listados na tabela Valores Básicos de Radionuclídeos não são diretamente aplicáveis para transporte de minérios naturais e para transporte de minérios contendo radionuclídeos naturais

que tenham sido processados (NORM). Neste caso, os valores para isenção deverão ser 10 vezes superiores àqueles valores citados na tabela. Deste modo, o nível de atividade específica para inserção para urânio natural (definido como aquele urânio processado ou não, mas que mantêm a distribuição natural de isótopos: 99,28% ^{238}U e 0,72% de ^{235}U) ou tório natural é de 10 $Bq.g^{-1}$. A atividade total por remessa para material contendo urânio natural ou tório natural é de 1 10^4 Bq. Para ^{40}K, considerando que o valor de isenção é 10 vezes o valor tabelado, a atividade específica é 100 $Bq.g^{-1}$, e a atividade total por remessa é de 1 10^7 Bq. A tabela inclui ainda níveis para isenção de controle regulatório para efeito de transporte de radionuclídeos importantes da cadeia do ^{238}U e ^{232}Th, como ^{226}Ra, ^{210}Pb e ^{228}Ra. Os níveis para isenção para materiais contendo estes radionuclídeos é o mesmo para cada um deles: 100 $Bq.g^{-1}$. Por remessa, a atividade total é de 1 10^5 Bq para os dois primeiros e 1 10^6 Bq para ^{228}Ra.

No documento, estão ainda reportadas as metodologias a serem seguidas quando parte das atividades dos radionuclídeos presentes no material é desconhecida. A classificação de NORM, segundo o SSR-6, é de material de atividade específica baixa: Low specific activity material: LSA-I.

Ainda para efeito de transporte internacional, o transporte deve seguir normas de organizações como a Organização Marítima Internacional e a Organização Internacional de Aviação Civil, as quais seguem basicamente as recomendações da IAEA apenas introduzindo algumas regras específicas.

Nos Estados Unidos da América, o transporte de material radioativo é regulamentado pelo DOT (Department of Transportation) e pela NRC (Nuclear Regulatory Comission). O DOT regulamenta as normas de embalagem, transporte, e manipulação de material radioativo, incluindo rotulação, documentação e requisitos de embarque e desembarque. Especifica ainda o trei-

namento necessário para os trabalhadores envolvidos na manipulação e transporte de material perigoso. A NRC regulamenta as operações de empacotamento e transporte de instalações por ele licenciadas, incluindo a expedição comercial de material radiativo. Fixa desenhos e testes padrões para embalagens contendo altos níveis de radioatividade. A NRC também estabelece regulamentos de segurança e salvaguardas com a finalidade de minimizar a possibilidade de roubo e ataque de certas expedições. As normas americanas seguem as recomendações da IAEA, Safety Series 6 (SS6-1985).

No Brasil, cabe à CNEN regulamentar e realizar inspeções para verificar o cumprimento dos requisitos estabelecidos nas normas.

Alguns tópicos da norma brasileira

No Brasil, para propósito de transporte, material radioativo é definido como aquele que possui atividade específica é maior do que 70 Bq/g. Exemplos de materiais radioativos transportados usualmente são combustíveis nucleares, isótopos para uso em medicina, indústria, agricultura e fontes para uso em indústria, dentre outros.

Seja por via aérea, marítima, ou terrestre, o transporte deste tipo de material deve cumprir as exigências da Norma CNEN-NE-5.01. A CNEN estabelece, por meio desta, os requisitos de segurança e proteção radiológica a serem atendidos desde a origem até o destino final das remessas, de forma a assegurar o adequado nível de controle da eventual exposição de pessoas, bens e meio ambiente aos efeitos das radiações ionizantes. A norma brasileira, que também segue as diretrizes da IAEA contidas no documento *Safety Series* 6 (SS6-1985), em linhas gerais, versa sobre:

- Especificações sobre materiais radioativos para transporte;
- Seleção do tipo de embalado;
- Especificação dos requisitos de projeto e de ensaios de aceitação de embalados;
- Disposições pertinentes ao transporte propriamente dito;
- Responsabilidades e requisitos administrativos sobre o transporte.

Em relação à legislação da CNEN, devem também ser atendidas as normas CNEN-NE-3.01, "Diretrizes Básicas de Radioproteção", CNEN-NE-3.02, "Serviços de Radioproteção" e Norma CNEN-NE-2.01, "Proteção Física de Unidades Operacionais da Área Nuclear", quando aplicáveis.

Adicionalmente, outros órgãos da União envolvidos com a regulação do transporte possuem normas referentes à movimentação de materiais perigosos e, consequentemente, de material radioativo. Estas se encontram em consonância com a Norma 5.01, da CNEN, e também devem ser observadas. São exemplos destas:

- ANTT - Agência Nacional de Transporte Terrestre - Resolução 420;
- ANTAQ - Agência Nacional de Transporte Aquático - Resolução 2239;
- ANAC - Agência Nacional de Aviação Civil - RBAC 175;
- MARINHA DO BRASIL - NORMAM 29;
- CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente - Resolução 237, LC140, IN 05;
- MTE - Ministério do Transporte - NR 29.

Referências Bibliográficas

AEC 1972. *Grand Junction Remedial Action Criteria*. 10 CFR 12. Atomic Energy Commission, Washington, D.C. 1972.

Basic Safety Standards (2013). *Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom.* Official Journal of the European Union vol 57, L13.

CHEN X.A., CHEN Y.G., XIAO H.J., FENG G.D., DENG Y.H., FENG Z.L., CHEN L.A., Han X.M., YANG Y.J., DONG Z.H. and ZHEN R. (2003). 20 year follow-up study on the effects of long-term exposure to thorium dust. Chinese Medical Journal 116, 692-694.

Council Directive 98/83/EC of 3 November 1998. Sobre a *qualidade da água para consumo humano*. http://ec.europa.eu/environment/water/water-drink/legislation_en.html, acesso em 16/08/2016.

Council Directive 96/29/EURATOM of 13. May, 1996, Laying down basic safety standards for the protection of the health of workers and the general public against the dangers arising from ionizing radiation.

Code of Federal Regulations USA. Title 10, Parts 1 to 50. Revised as of January 1, 2003.

DIRETIVA 2013/59/EURATOM DO CONSELHO, de 5 de dezembro de 2013. *Jornal Oficial da União Europeia*. L 13/1.

EC, 1999. *European Commission Report on Radiological Protection Principles concerning the natural radioactivity of building materials*. Radiation. Protection, Vol. 112.

(EPA) Environmental Protection Agency (1992). *Technical Support Document for the 1992 Citizen's Guide to Radon*. EPA 400-R-92-011. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, EUA.

HURST, C. (2010). *China's rare earth elements industry*: What can the west learn? Institute for the Analysis of Global Security (IAGS), Washington, USA.

IAEA (1985). INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material*, Safety Series No. 6, 1985 Edition, Vienna, Austria.

IAEA (2012). *Regulations for the safe transport of radioactive material*: specific safety requirements. Vienna: International Atomic Energy Agency. Vienna, Austria.

IAEA (2014). *Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards*. No GSR Part 3. International Atomic Energy Authority, Vienna, Austria.

ICRP (1984). *Principles for Limiting Exposure of the Public to Natural Sources of Radiation*. ICRP Publication 39. Ann. ICRP 14 (1), 1984.

ICRP, 1984. *Principles for Limiting Exposure of the Public to Natural Sources of Radiation*. ICRP Publication 39. Ann. ICRP 14 (1).

ICRP, 1991. 1990 *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3).

LAURIAa, D.C. and ROCHEDO, E.R.R. (2005). *The legacy of monazite processing in Brazil. Radiat*. Prot. Dosim. 114, 546-550.

NCRP 1993. Limitation of Exposure to Ionizing Radiation. NCRP Report 116*. National Council on Radiation Protection and Measurements*, Bethesda, Maryland. March 31, 1993;

REIS R.G. e LAURIA D. C. (2014). *The potential radiological impact from a Brazilian phosphate facility*. J Environ Radioact 136:188-194.

State Quality Supervision and Quarantine Inspection Bureau, People's Republic of China. *Professional Standard for Quarantine Inspection at Entry and Exit of People's Republic of China* – Rules of Radioactivity Inspection for Import Minerals. SN/T 1537-2005.

United States Environmental Protection Agency – USEPA (2000). *National primary drinking water regulations; radionuclides; final rule*. Part II. 40 CFR Parts 9, 141, and 142. Washington DC: USEPA.

NN 4.01 - Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Instalações Mínero-Industriais.

Resolução CNEN 179/14 - Uso do fosfogesso na agricultura e na indústria cimenteira.

NE 5.01 - Transporte de Materiais Radioativos.

BRASIL. *Câmara dos Deputados. Minerais Estratégicos e Terras Raras*. Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2014.

Law of the Peoples's Republic of China on Prevention and Controlo of Radioactive Pollution. 2003.

National Standard of the People's Republic of China. GB 6566-2010. Limits of radionuclides in building materials.

Professional Stadards for Quarantine Inspection of Import to and Export from the People's Republic of China. *Rules of Radioactivity Inspection for Import Minerals*. 2005.

CHENGHUI, MA. *Radiation Safety Regulatory Policy and Rule form NORM industries in China*. NORM VII. IAEA, Viena: 2016.

8

Gerenciamento de Resíduos/Rejeitos NORM

Flávia Schenato
Nerbe Jose Ruperti Junior

1. Introdução

Natural Occurring Radioactive Material – NORM refere-se a material radioativo que não contém quantidades significativas de radionuclídeos, exceto os radionuclídeos de origem natural. A definição exata de "quantidades significativas" é uma decisão regulatória. Materiais em que as concentrações da atividade dos radionuclídeos de origem natural forem alteradas tecnologicamente estão incluídos na definição de NORM. Um resíduo NORM é o material que resta de um processo industrial ou compreende material que está contaminado por radionuclídeos de origem natural e, desta forma, pode ou não ser um rejeito. Rejeito NORM é o material radioativo de ocorrência natural para qual não está prevista qualquer utilização [1].

NORM é designado por lei ou pelas autoridades reguladoras estando sujeito, portanto, ao controle, devido à sua radioatividade. O controle regulatório como uma prática inclui a opção de isenção, ou seja, se não é regulado, não é NORM.

Os principais radionuclídeos de origem natural importantes para efeitos da proteção radiológica são os da série de de-

caimento do U-238 e do Th-232 e o K-40. As concentrações de atividade desses radionuclídeos nos materiais naturais, tais como em rochas e minerais, são variáveis, mas geralmente, baixa, não conferindo motivo de preocupação para proteção contra as radiações [2]. As concentrações médias encontradas, são, em torno de 0,033 Bq/g de ^{238}U, 0,045 Bq/g de ^{232}Th e 0,412 Bq/g de ^{40}K [3]. No entanto, as concentrações de atividade em certos minerais podem ser elevadas e, significativamente, aumentada durante o processamento mineral. A exposição a fontes naturais está normalmente sujeita a requisitos para situações de exposição existentes [4]. Porém, se as concentrações de atividade são elevadas, acima dos níveis de fundo, o controle regulatório para situações de exposição planejada deve ser considerado [3, 4].

A geração de resíduos NORM está relacionada às atividades industriais de exploração dos recursos minerais e energéticos, notadamente, a mineração, o beneficiamento físico, químico e processos térmicos que visam separar, extrair e processar esses recursos. As principais indústrias que geram NORM e exigem algum tipo de consideração regulatória são as de mineração e processamento de Urânio e Tório, extração de Terras Raras, Nióbio, Fosfatos, Zircão, E&P de Óleo e Gás, Produção de Metais (Sn, Zn, Cu, Pb), pigmentos de TiO_2 e Carvão [3]. Esses processos podem conduzir à mobilização seletiva dos radionuclideos naturais e ao rompimento do equilíbrio secular da cadeia de decaimento gerando produtos, subprodutos, resíduos e rejeitos com elevadas concentrações. Os efeitos são a exposição ocupacional e a do público à radiação gama, inalação de poeiras contendo radionuclídeos de meia-vida longa e exposição ao Radônio/Torônio e seus progenitores.

Historicamente, a maior parte da regulamentação internacional tem focado na extração e processamento de minério de urânio, porque tais atividades têm consequências diretas sobre a exposição à radioatividade e são partes essenciais do ciclo do combustível nuclear. No entanto, nas últimas décadas muitos

países introduziram medidas para regular as práticas provenientes da utilização de uma ampla gama de minérios convencionais e outras matérias-primas que contém U e Th associados, do que somente aquelas relacionadas com a extração de urânio [2].

No Brasil, NORM está tipicamente associado com as indústrias não nucleares, ou seja, com as indústrias de extração e processamento de minério convencional. Do ponto de vista regulatório, a mineração e beneficiamento de urânio constituem monopólio da união e, portanto, segue a legislação do ciclo do combustível nuclear, não aplicável à NORM [5].

As instalações de extração e processamento mineral no Brasil lidam com diferentes minérios e matérias-primas com U e Th associados e têm sido supervisionadas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). De modo geral, as principais indústrias que geram NORM, na forma de subprodutos, resíduos e rejeitos, são: [5]

- Produção de Fosfato: O produto principal é o ácido fosfórico utilizado na fabricação de fertilizantes. No processamento de fosfato, o fosfogesso é produzido como um subproduto que contém Ra-226 e Ra-228;
- Processamento de Minérios: a obtenção de metais por processos térmicos ou químicos, a partir de minérios como a cassiterita (Sn), columbita-tantalita e pirocloro (Nb, Fe, Ta, ETR), entre outros, produz resíduos e rejeitos que contém concentrações variáveis de urânio e tório associados.

O processo de verificação ao cumprimento dos requisitos de segurança e de proteção radiológica nas instalações mínero-industriais são estabelecidos na norma CNEN-NN-4.01 [6] e implementado através de inspeções e auditorias. As instalações são inicialmente classificadas com base em uma abordagem gradual quanto ao risco e diferentes aspectos são considera-

dos no processo de fiscalização das instalações que lidam com NORM [5]. Na última década, as inspeções têm indicado que o principal problema enfrentado pela indústria mínero-industrial é a gestão e a deposição de NORM, muitas vezes, de forma inadequada, com consequências à proteção do público e ambientais.

Além das indústrias mínero-industriais, as atividades de E&P de petróleo e gás produzem igualmente resíduos e rejeitos de NORM, com concentrações significativas de Ra-226, Ra-228 e Pb-210. Desde a década de 80, as agências reguladoras internacionais têm aumentado o controle e a proteção radiológica concernente à geração de NORM nas indústrias de E&P. No Brasil, o controle regulatório exercido pela CNEN iniciou-se no final da década de 90, com a finalidade de verificar o cumprimento dos requisitos de segurança e de radioproteção para os trabalhadores, público e meio ambiente nas instalações de armazenamento de NORM. O gerenciamento desses rejeitos devem seguir os requisitos estabelecidos em Normas da CNEN. No entanto, as diretrizes regulatórias nacionais não são endereçadas especificamente para a deposição em longo prazo, sendo a maior parte deste material armazenado nas instalações até que orientações para a deposição sejam desenvolvidas [7].

Os problemas de gestão de resíduos/rejeitos NORM estão relacionados ao seu grande volume, à sua presença em setores não-radiológicos e à variabilidade da sua composição química, física e propriedades radiológicas que diferem de indústria para outra e de um local para o outro [8]. Encontrar uma rota de gerenciamento seguro para NORM e anunciar uma estratégia neste domínio é um desafio para as autoridades reguladoras brasileiras. A opção de reciclagem/reutilização tem sido uma tendência internacional que é considerada depois de avaliar as propriedades radiológicas dos resíduos e estabelecer uma estrutura regulamentar e legal para isso. Existem muitas opções para a reciclagem segura de resíduos NORM de volta aos processos

que os geraram. Da mesma forma, há muitas opções para a utilização segura dos resíduos NORM como subprodutos. Portanto, o resíduo NORM deve ser considerado mais como um recurso e não como um rejeito [8]. Para algumas categorias de NORM, no entanto, a deposição como rejeito é a única opção e devem estar sujeitas à mesma abordagem global para rejeitos radioativos, a fim de assegurar a sua gestão segura, tecnicamente ideal e de custo viável [8]. Pesquisas neste campo podem contribuir para a caracterização do risco e avaliação de seus impactos ambientais.

Atualmente, encontra-se em elaboração pela AIEA o documento *Draft Safety Guide DS-459 "Management of Radioactive Residues from Uranium Production and Other NORM Activities"*, que aplica os conceitos presentes na última versão do *Basic Safety Standards* da AIEA à gerência de resíduos radioativos gerados na produção de urânio e também por instalações mínero-industriais com NORM.

2. Critérios de Isenção e Dispensa

Os conceitos de isenção e dispensa de controle regulatório adotados na norma CNEN-NN-3.01 [9] são os mesmos preconizados internacionalmente [4]. Isenção é o ato regulatório que isenta uma prática ou uma fonte associada a uma prática de posterior controle regulatório, sob o ponto de vista de proteção radiológica, enquanto que dispensa é a retirada do controle regulatório de materiais ou objetos radioativos associados a uma prática autorizada, o que permite que estes materiais ou objetos sejam removidos do sítio sem restrições adicionais.

Como princípio geral para a isenção ou para a dispensa de controle regulatório de uma fonte de radiação, considera-se que os riscos associados à radiação são irrelevantes (suficientemente baixos de forma a estarem relacionados a danos radiológicos irrelevantes), de forma a não necessitar o cumpri-

mento de requisitos de proteção radiológica. A probabilidade de cenários que levem ao não atendimento a este princípio geral deve ser irrelevante. Outro critério seria atendido quando o controle ou continuidade do controle regulatório da fonte não acrescenta nenhum benefício adicional, no qual nenhuma medida razoável para o controle regulatório iria ter um resultado significativo em termos de redução das doses individuais ou de riscos à saúde.

Fontes de radiação estarão isentas ou poderão ser dispensadas de controle regulatório desde que em todas as situações razoavelmente previstas a dose efetiva esperada, a ser recebida por qualquer indivíduo do público devido à fonte seja inferior ou da ordem de 10 mSv em qualquer período de um ano. De forma a considerar cenários de baixa probabilidade, um critério adicional pode ser adotado, no qual a dose efetiva esperada, a ser recebida por qualquer indivíduo do público para estes cenários de baixa probabilidade, não exceda 1 mSv em um ano.

Baseando-se nos critérios acima, fontes de radiação estarão isentas de controle regulatório, se a atividade total de um radionuclídeo em um dado momento ou a sua concentração de atividade, tal como utilizada na prática, não excedam os níveis de isenção apresentados na Tabela I.1 (p. 111) do *Basic Safety Standards* da AIEA [4], para quantidades moderadas (abaixo de uma tonelada). No caso de grandes quantidades de materiais com radionuclídeos artificiais (acima de uma tonelada), estes estarão isentos ou poderão ser dispensados de controle regulatório, se a concentração de atividade de um dado radionuclídeo estiver abaixo do limite estabelecido na Tabela I.2 (p. 124).

Para a dispensa de grandes quantidades de materiais com a presença de radionuclídeos naturais, como é o caso dos NORMs da indústria de petróleo e de instalações mínero-industriais, os limites de concentração de atividade estão estabelecidos na Tabela I.3 (p. 128) e correspondem a 10 Bq/g

para K-40 e a 1 Bq/g para cada radionuclídeo da cadeia de decaimento radioativo do urânio ou do tório. Para radionuclídeos de origem natural em resíduos que podem ser reciclados em materiais de construção, ou cuja deposição possa causar contaminação de fontes de água potável, a concentração de atividade nos resíduos não deve exceder valores específicos derivados, de forma a atender o critério de dose da ordem de 1 mSv em um ano, que é compatível com doses típicas devido à radiação de fundo.[4]

No Brasil, materiais radioativos estarão isentos da aplicação de requisitos de proteção radiológica, quando a atividade total de um dado radionuclídeo presente a qualquer momento ou a concentração de atividade usada não exceda os níveis de isenção apresentados na Tabela 1 da Posição Regulatória PR-3.01/001 [10]. A Tabela 1 foi baseada em uma versão mais antiga do *Basic Safety Standards* da AIEA (1996) [11] e é aplicável para quantidades moderadas de material, isto é, até o máximo de 1 (uma) tonelada de material radioativo. Os níveis de dispensa para materiais sólidos contendo radionuclídeos artificiais e naturais estão estabelecidos no Anexo VI da Norma CNEN-NN-8.01 [12] para moderadas (abaixo de uma tonelada) e grandes quantidades. Os valores apresentados no Anexo VI para quantidades moderadas são os mesmos da Tabela 1 da PR-3.01/001, e no caso de grandes quantidades, foram adotados os mesmos níveis de dispensa das Tabelas 1 e 2 do *Safety Guide No. RS-G-1.7* da AIEA (2004) [13], para radionuclídeos naturais e artificiais, respectivamente. As Tabelas 1 e 2 também foram incorporadas à última revisão do *Basic Safety Standards* de 2014 [4]. Portanto, no Brasil, adota-se os mesmos valores de níveis de dispensa para grandes quantidades de materiais sólidos com radionuclídeos naturais, quais sejam: concentração de atividade de 10 Bq/g para K-40 e de 1 Bq/g para cada radionuclídeo da cadeia de decaimento radioativo do urânio ou do tório.

3. Legislação & Estrutura Regulatória

O governo brasileiro, através da CNEN, no exercício das competências que lhe são atribuídas (Leis n° 4.118 (1962) [14], nº 6189 (1974) [15] e nº 7781 (1989) [16], é responsável pelo destino final dos rejeitos radioativos produzidos no país. Portanto, a CNEN é responsável pela concepção, construção e operação de instalações de deposição de rejeitos radioativos, tal como previsto na Lei Federal 10.308, de 2001 [17].

A Lei 10.308 estabelece requisitos gerais para o destino dos rejeitos radioativos e as regras para a escolha do local, construção, operação, licenciamento, financiamento, responsabilidade civil e garantias relacionadas com o armazenamento e deposição de rejeitos radioativos. A CNEN é responsável pela concessão de licenças às instalações de armazenamento e deposição de rejeitos, no que se refere aos aspectos referentes ao transporte, manuseio e tratamento, bem como à segurança e proteção radiológica, sem excluir as licenças ambientais aplicáveis e outros requisitos legais.

A Lei Federal proíbe o depósito de rejeitos de quaisquer naturezas nas ilhas oceânicas, na plataforma continental e nas águas territoriais brasileiras, bem como a importação de rejeitos radioativos. Os tipos de depósitos de rejeitos radioativos previstos em lei são os depósitos iniciais, intermediários e finais, cujos critérios e procedimentos legais para a instalação e operação são estabelecidos em normas da CNEN. O projeto, a construção e a operação de depósitos iniciais são de responsabilidade do titular da instalação onde são gerados os rejeitos, outorgada pela CNEN. No entanto, cabe à CNEN projetar, construir e operar os depósitos intermediários e finais, podendo haver a delegação destes serviços a terceiros, desde que mantida a sua integral responsabilidade.

Ainda, segundo o disposto na Lei 10.308, os depósitos iniciais utilizados para o armazenamento de rejeitos nas insta-

lações de extração e de beneficiamento de minério poderão ser convertidos em depósitos finais, no local, mediante expressa autorização da CNEN.

A fim de cumprir a legislação federal, a Norma CNEN -NN-8.02 (2014) [18] estabelece critérios gerais e requisitos básicos de segurança e de proteção radiológica para o licenciamento de instalações de armazenamento e deposição de rejeitos de Baixo e Médio Nível de Radiação (RBMN). O processo de licenciamento das instalações de rejeitos radioativos é um processo "passo a passo", ao envolver licenças administrativas para a Aprovação do Local e Autorizações para Construção, Operação, Descomissionamento e Encerramento (requerida somente para depósitos finais). Cada ato está condicionado ao atendimento de requisitos específicos apresentados no Relatório do Local (RL), Relatório Preliminar de Análise de Segurança (RPAS), Relatório Final de Análise de Segurança (RFAS) e Relatório Final de Análise de Encerramento do Local (RFAEL).

Os requisitos para o licenciamento, estabelecidos na CNEN-NN-8.02, aplicam-se às instalações de rejeitos no país, definidas em lei:

1. *Depósito inicial*: destinado ao armazenamento de rejeitos radioativos, cujo titular da instalação geradora de rejeito é a entidade jurídica responsável pela administração e operação do depósito, com licença concedida pela CNEN.
2. *Depósito intermediário*: destinado a receber e, eventualmente, acondicionar rejeitos radioativos, com vistas à remoção para o depósito final, em observância aos critérios de aceitação estabelecidos na Norma CNEN-NN-6.09 [19]. A CNEN é a entidade jurídica responsável pela administração e operação destes

depósitos, através dos seus institutos de pesquisa e tecnologia nuclear.

3. *Depósito final*: destinado à deposição final de Rejeitos de Baixo e Médio Nível de Radiação, em que a CNEN é responsável pela sua concepção, construção e operação.

A norma CNEN-NN-8.02 aplica-se somente ao licenciamento de instalações de rejeitos de Baixo e Médio Níveis de Radiação (Classe 2), de acordo com a classificação adotada no país (Tabela 1). O esquema de classificação de rejeitos é apresentado em ambas normas da CNEN, NN-8.01 e NN-8.02, e baseia-se na classificação do *General Safety Guide* da AIEA N° GSG-1 (2009) [20]. O esquema leva em conta o nível e a natureza da radiação, a meia-vida dos radionuclídeos e os métodos de dispensa ou de deposição relacionados a cada classe de rejeito, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1. Classificação, características e métodos de deposição de rejeitos radioativos.

CLASSE	CARACTERÍSTICAS	MÉTODOS DE DISPENSA OU DEPOSIÇÃO
0. Rejeito Isento	Rejeitos contendo radionuclídeos com valores de atividade ou de concentração de atividade, em massa ou volume, inferiores ou iguais aos respectivos níveis de dispensa. [1]	Sem restrição.
1. Rejeitos de Meia-vida Muito Curta	Rejeitos com meia-vida ≤ 100 dias, com níveis de atividade ou de concentração de atividade superiores aos respectivos níveis de dispensa. [1]	Armazenados para decaimento e posterior dispensa.

2. Rejeitos de Baixo e Médio Níveis de Radiação	Rejeitos com meia-vida superior à dos rejeitos da Classe 1. Níveis de atividade ou de concentração de atividade superiores aos níveis de dispensa e com potência térmica inferior a 2 kW/m^3.	
2.1. Meia-vida Curta	Emissores beta/gama com meia-vida $\leq$ 30 anos e com concentrações de radionuclídeos emissores alfa de meia-vida longa $<$ 3700 kBq/kg, acondicionados em volumes individuais e com valor médio de 370 kBq/kg para o conjunto de volumes.	Depósitos próximos à superfície.
2.2. e 2.3 Contendo Radionuclídeos Naturais	Rejeitos provenientes da exploração de petróleo e de matérias-primas minerais, naturais ou industrializadas, respectivamente, contendo radionuclídeos das séries do U e do Th em concentrações de atividade ou atividades acima dos níveis de dispensa. [1]	Depósitos próximos à superfície ou em profundidade definida pela Análise de Segurança
2.4. Meia-vida Longa	Rejeitos não enquadrados nas Classes 2.2 e 2.3, com concentrações de radionuclídeos emissores alfa de meia-vida longa superiores ao estabelecido em 2.1.	Depósitos Geológicos
3. Rejeito de Alto Nível de Radiação	Potência Térmica superior a 2kW/m^3 e concentração de radionuclídeos emissores alfa superiores as estabelecidas para os rejeitos de meia-vida curta.	Depósitos Geológicos

1. Norma CNEN-NN-8.01 “Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação”.

Os rejeitos contendo radionuclídeos de origem natural, das séries de decaimento do urânio e do tório, são enquadrados nas Classes 2.2 e 2.3 provenientes, respectivamente, das indústrias de E&P de petróleo e gás e das indústrias de mineração e/ou beneficiamento de minérios.

Para todas as classes de rejeitos de Baixo e Médio Níveis de Radiação (Classes 2.1 a 2.4), a regulação nacional apresenta disposições e requisitos específicos para o processo de licenciamento, incluindo o período de construção, operação e o programa de descomissionamento, que são aplicáveis aos depósitos *iniciais* e *intermediários,* cuja finalidade são o armazenamento e o gerenciamento seguro dos rejeitos (*cf*. Anexo II). Especificamente, para as Classes 2.2 e 2.3, esses requisitos são aplicáveis desde que estes rejeitos estejam acondicionados em embalagens (Art. 2º; §3º). Já em relação à deposição, em longo prazo, a Norma CNEN NN 8.02 somente estabelece requisitos específicos para o licenciamento de depósitos *finais*, destinados à Classe 2.1 (RBMN meia-vida curta) (Anexo III).

Para as classes 2.2 e 2.3, a norma prevê a deposição próxima à superfície (*near surface disposal*) ou em profundidades definida pela análise de segurança (Tabela 1), mas não estão estabelecidos os ritos para o licenciamento de *depósitos finais* para estes rejeitos. A questão é que as características dessas classes de rejeitos, em geral, envolvem aspectos que podem exigir a deposição em maiores profundidades do que aquelas previstas para instalações próximas à superfície. Estes aspectos estão relacionados, principalmente, à presença de radionuclídeos de meia-vida longa e aos níveis de concentração de atividade elevados de alguns materiais, que podem não cumprir com os critérios de aceitação de rejeitos destinados a depósitos próximos à superfície.

Portanto, diferentes tipos de rejeitos NORM podem requerer diferentes opções para deposição. Dependendo das características radiológicas dos rejeitos NORM, maiores profundidades

têm sido consideradas como uma alternativa para a deposição, cujas vantagens e desvantagens intrínsecas, quanto aos aspectos de segurança e viabilidade técnica e econômica, devem ser considerados, para fins de licenciamento. [21, 22, 23, 24, 25]

A gestão de NORM e as alternativas para sua deposição segura, em longo prazo, são complexas e envolvem vários aspectos a serem considerados. Uma das questões fundamentais são os grandes volumes de rejeitos armazenados *in situ* nas instalações de extração e de beneficiamento de minérios convencionais que devem ser gerenciados considerando a possibilidade de serem convertidos em depósitos finais, de acordo com a Lei 10.308. A fim de otimizar o processo de deposição, os requisitos de segurança e de proteção devem orientar a construção e operação, considerando que esses depósitos devem ser projetados para conter rejeitos de NORM por longos períodos e seu controle deverá reverter para as autoridades nacionais, para a monitoração permanente e com usos futuros restritos do local, após ao fechamento. [5]

4. Deposição de Rejeitos de NORM

Deposição é a última etapa da gerência de rejeitos radioativos, quando o rejeito não pode ser dispensado do controle regulatório, e implica sua contenção em um depósito final, sem a intenção de recuperá-lo e, preferencialmente, sem a necessidade de manutenção e vigilância do depósito em longo prazo. O isolamento do rejeito da biosfera deve ser garantido através do uso de barreiras de engenharia, da ação das barreiras naturais no retardamento da migração dos radionuclídeos na geosfera e de uma criteriosa seleção de local para a construção do depósito final.

A opção escolhida para o sistema de deposição deve garantir a segurança radiológica em longo prazo, o que deve ser demonstrado através de uma análise de segurança que faça a

predição das doses efetivas em indivíduos do público para os cenários considerados, de forma a assegurar a proteção tanto da atual quanto das futuras gerações. Os resultados da análise de segurança servirão como referência para limitar os valores máximos de concentração de atividade do rejeito que poderá ser aceito e a capacidade do depósito. Como as barreiras de engenharia possuem uma durabilidade limitada com relação às meia-vidas dos radionuclídeos das cadeias de decaimento do U e do Th, deve ser considerada a sua degradação em um estudo em longo prazo. Mesmo as camadas de argila compactada usadas para diminuir a permeabilidade do sistema de deposição à água de chuva têm a sua condutividade hidráulica reduzida ao longo do tempo.

As classificações dos rejeitos radioativos adotadas internacionalmente visam à sua deposição e refletem o princípio de que quanto maior for a sua concentração de atividade, maior deverá ser a segurança do depósito final. De acordo com a recomendação da AIEA, o rejeito NORM, que geralmente contém quantidades significativas de radionuclídeos com meia-vida muito longa, seria geralmente, classificado como rejeito de baixo nível de radiação, de muito baixo nível de radiação, ou isento. Seguindo esse princípio, rejeitos não-isentos contendo NORM poderiam, a princípio, ser destinados a depósitos finais em superfície ou próximos à superfície. Porém, em alguns casos, pode ocorrer uma concentração de atividade que justifique a sua classificação como rejeito de nível intermediário de radiação. Neste caso, e de forma a reduzir o risco de intrusão humana ou animal, as opções mais apropriadas seriam a deposição em profundidade definida pela análise de segurança ou a deposição geológica.

A segurança radiológica e não-radiológica de um depósito em superfície para NORM, após o fechamento da instalação, dependerá do uso previsto para o solo, que poderá ser residencial, industrial, recreacional, destinado à agricultura ou à

agropecuária, ou completamente interditado à ocupação. Um controle institucional ativo ou passivo deverá ser adotado de forma a garantir que o local do depósito final seja utilizado de uma forma apropriada, o que poderá incluir medidas como a restrição ao uso da terra, controle de acesso, manutenção de registros e uso de marcadores para gerações futuras.

O rejeito NORM de baixo nível de radiação gerado por uma instalação mínero-industrial, geralmente, é destinado a um depósito em superfície construído na propriedade da instalação. O rejeito produzido em moderadas ou grandes quantidades são depositados em pilhas, aterros ou trincheiras no sítio da instalação, evitando o seu transporte para fora da propriedade, o que poderia significar um grande custo e aumento do risco radiológico. O resíduo, geralmente, é armazenado em depósitos iniciais, construídos com barreiras de engenharia e barreiras naturais, podendo, eventualmente, ser convertidos em depósitos finais mediante a aprovação do órgão regulador. Portanto, os depósitos iniciais devem ser projetados com esta finalidade, embora possam surgir oportunidades para a comercialização do resíduo como *by-product*, como é o caso de depósitos de fosfogesso. Um projeto de depósito em superfície considera a utilização de camadas de geomembrana para a impermeabilização do fundo e da cobertura, podendo ser simples ou duplas, com sistemas de escoamento da água de chuva e de captura de percolado. Essas camadas são associadas a outras de argila compactada que têm a função de reduzir a permeabilidade do sistema de deposição no caso de falha das geomembranas. Também deve ser instalada uma camada de cobertura com vegetação nativa da região para reduzir a erosão, aumentar a evapotranspiração e reduzir o risco de intrusão animal. Uma outra opção, algumas vezes, adotada para a deposição do rejeito NORM produzido em mineração é a sua deposição na cava exaurida da mina.

A deposição em profundidade é uma alternativa à deposição em superfície e oferece diversas opções, cada qual com as

suas vantagens e desvantagens intrínsecas quanto aos aspectos de segurança e viabilidade econômica. Dentre as opções pode-se destacar:

1. Minas desativadas: o método consiste em usar minas subterrâneas desativadas como repositório geológico para a deposição de rejeitos de NORM, através do acondicionamento em containers. Embora muitos locais possam se apresentar como potenciais, esta opção pode apresentar possibilidades de contaminação de aquíferos e de oposição pública;
2. Cavernas de Sal: cavidades formadas em domos salinos (evaporitos), em subsuperfície, têm sido utilizadas para a deposição de rejeitos de NORM em vários países (EUA, Canadá, Alemanha), devido à estabilidade geológica que o meio apresenta. O método consiste em deposição em cavidades criadas pela mineração, através da escavação, ou criadas pela dissolução, para este fim. Em cavidades escavadas, há a necessidade de acondicionamento de rejeitos sob forma de embalados. Já em cavidades por dissolução, os rejeitos são injetados enquanto que a salmoura é retirada através de poços. Os riscos estão associados à intrusão inadvertida e à contaminação através da liberação de fluidos pelas fissuras de dissolução ou de vedação;
3. Injeção e fraturamento hidráulico: o método consiste na injeção de sólidos contendo NORM, por fraturamento hidráulico, dentro de formações rochosas em subsuperfície, isoladas geológica e mecanicamente;
4. Encapsulamento e deposição em poços: o método consiste em deposição de rejeitos de NORM, encapsulados ou não, nas seções de poços abandonados. Não há necessidade de condicionamento do rejeito

antes da deposição. Contudo, o método não é aplicável a grandes volumes, devido à geometria dos poços e à necessidade de serem avaliados, caso a caso, para o processo de licenciamento.

Os exemplos acima são adotados, principalmente, para a deposição de NORM da indústria de petróleo e gás [21, 22, 23, 24, 25], no entanto, a deposição de outras classes de rejeitos radioativos em minas subterrâneas desativadas e em cavernas de sal têm sido adotadas em alguns países.

5. Reutilização e Reciclagem

A reutilização e reciclagem de materiais têm sido recomendadas como parte da abordagem geral da estratégia aplicável à gestão de resíduos NORM [2, 8, 26]. Existem várias formas de atenuar, reduzir ou controlar os riscos associados à gestão de um determinado fluxo de resíduos NORM. A abordagem otimizada para o desenvolvimento de uma estratégia de gerenciamento implica considerações em todas as etapas abrangendo o pré-tratamento, tratamento, acondicionamento, reutilização e reciclagem, armazenamento e a deposição, em longo prazo, priorizando as técnicas de minimização que devem ser consideradas em cada fase do ciclo de vida da instalação. [8]

As quantidades de resíduos que necessitam de gerenciamento, em longo prazo, devem ser mantidas ao mínimo praticável. Ao invés, as opções para a dispensa, reutilização e reciclagem devem ser utilizadas, na medida do possível, em conformidade com os requisitos regulatórios aplicáveis. A deposição autorizada, incluindo a deposição em uma instalação de disposição de resíduos industriais existente, como medida de minimização, deve ser considerada, desde que o planejamento da operação inclua aspectos sobre o controle radiológico

e não-radiológico, avaliando os riscos após encerramento da instalação [8]. As opções para a reutilização e reciclagem viável e segura são preferíveis antes de designar os resíduos NORM como rejeitos

A caracterização dos resíduos é um fator importante para um controle apropriado. A caracterização permite o desenvolvimento de uma compreensão completa das características físicas, químicas e radiológicas dos resíduos a serem reutilizados, reciclados ou para a deposição, em longo prazo. Nesse sentido, a implementação de opções para a reutilização e reciclagem exige a disponibilidade de critérios de dispensa adequados na regulação do país e, nomeadamente, de metodologias e instrumentação de medição adequada.

A reutilização pode ser definida como o reaproveitamento de materiais para uma finalidade outra, a partir da sua forma original, ou em um estado recuperado. A reciclagem é a utilização de materiais, ferramentas e equipamentos para um propósito diferente do original, com ou sem tratamento. As opções de reutilização e reciclagem têm se tornado atraentes, em muitos países, pelo forte incentivo econômico em utilizar os grandes volumes de resíduos NORM e para evitar os custos associados à gestão, em longo prazo. A decisão de reutilizar e reciclar depende de muitos fatores que são específicos para um determinado fluxo de resíduos, indústria ou país.

Alguns países estão elaborando disposições específicas em seus sistemas de regulação para incluir a reciclagem de resíduos NORM e o seu reúso. A legislação da Holanda aponta o uso de subprodutos de NORM como alvo principal de um sistema de gestão de resíduos. Para aplicação em engenharia civil, a legislação holandesa estabeleceu que o resíduo NORM pode ser diluído a um nível tal que não é mais considerado radioativo (na medida em que não exceda o nível de isenção relevante). Assim, a diluição, neste caso, não é apenas uma opção de tratamento, mas também uma obrigação legal [27].

A mistura de material radioativo com material não radioativo dilui o conteúdo de radionuclídeos e, assim, reduz a concentração de atividade. Isso reduz o risco resultante de exposições. No entanto, a diluição, por si só, não reduz a massa de contaminantes, em vez disso, pode aumentar a área de exposição potencial, em alguns casos. Para alguns Estados-Membros, a diluição deliberada de resíduos NORM, para tornar resíduos isentos, sem a aprovação do órgão regulador não é permitida. Mas a autoridade competente pode autorizar, em situações específicas, a mistura de resíduos radioativos contendo NORM com outros materiais para promover a reutilização e a reciclagem destes materiais e para reduzir a exposição pública. A diluição com material não radioativo é uma opção que pode ser considerada para alguns tipos de resíduos. A diluição como um meio de aumentar as quantidades de resíduos NORM, que podem ser reaproveitados como subproduto deve não só ser permitida, em termos de abordagem nacional, mas também encorajada [8].

A reciclagem e reúso de resíduos NORM como materiais de construção devem satisfazer, segundo as recomendações dos *Safety Standards* da AIEA [4, 28], aos critérios radiológicos aplicáveis a *commodities* e só devem ser implementados após os resíduos serem liberados da supervisão radiológica. Para materiais de construção, o nível máximo de referência é semelhante ao limite de dose para o público, de modo que o nível de controle é similar ao de uma prática. O estabelecimento de níveis de referência específicos para a exposição devido aos radionuclídeos em *commodities*, como material de construção, “deve tipicamente ser expresso como, ou basear-se, em uma dose efetiva anual para a pessoa representativa, que não exceda um valor de cerca de 1 mSv “ [28]. O nível de referência de cerca de 1 mSv aplica-se à dose recebida por exposição à radiação gama, a partir dos materiais de construção, excluindo qualquer dose adicional de ^{222}Rn ou ^{220}Rn liberada *indoor* [28].

Os exemplos mais comuns de reúso e reciclagem de resíduos NORM são os do fosfogesso, a fundição de sucatas metálicas e de escórias industriais e o uso de cinzas de centrais termoelétricas à carvão, recicladas como materiais de construção.

Para a reciclagem ou reutilização de fosfogesso existem várias opções, tais como aditivo de fertilizantes, em construção de estradas e como materiais de construção. A utilização de fosfogesso reduz o custo de materiais de construção e minimiza os impactos radiológicos, com a remoção das pilhas estocadas nos pátios das indústrias. Na reciclagem de fosfogesso para a agricultura não são apenas os aspectos radiológicos que devem ser considerados. Outros contaminantes associados podem ter um impacto sobre a aplicabilidade deste resíduo no solo. Informações mais detalhadas podem ser encontradas no AIEA *Safety Report Series* n° 78 [29].

No Brasil, o uso de fosfogesso é regulado pela CNEN. A Resolução n° 179/14 dispõe sobre o nível de dispensa para o uso do fosfogesso na agricultura ou na indústria cimenteira. A resolução estabelece o valor limite de 1.000 Bq/Kg para concentração de atividade de Rádio-226 ou de Rádio-228, para cada radionuclídeo, em conformidade com os princípios de exclusão, dispensa e isenção para quantidades superiores a uma (01) tonelada, recomendados no Guia de Segurança IAEA RS-G-1.7/2004 [13]. A autorização para o seu uso está condicionada ao cumprimento do Guia Regulatório publicado na Portaria CNEN/DRS n° 09/13, que estabelece o procedimento para verificação e análise do fosfogesso para seu uso na agricultura e na indústria cimenteira.

A sucata contaminada por NORM pode, em muitos casos, ser descontaminada por meio de vários métodos e, assim, ser reciclada. Muitos exemplos são apresentados na literatura, principalmente, para a descontaminação de equipamentos empregados na indústria de petróleo e gás, que visam retirar as incrustações ricas em Ra-226 e Ra-228, que se formam

no interior das tubulações. No Brasil, a descontaminação de tubulações empregadas nas rotinas de operação da exploração e produção de petróleo é uma prática autorizada, a fim de permitir sua reutilização após o processo de descontaminação, dentro das condições de segurança radiológica. O processo de desincrustação e descontaminação prevê que o material sólido removido seja conduzido para armazenamento.

A Norma CNEN-NN-8.01 [12] estabelece o valor de 3 kBq/m^2 para a dispensa incondicional de grandes quantidades de objetos contaminados na superfície por radionuclídeos das séries naturais, considerando o radionuclídeo pai e seus descendentes em equilíbrio secular.

Em alguns países, a sucata contaminada por NORM pode também ser diretamente fundida em fornos dedicados apenas para esse fim. O aço resultante é reciclado e os radionuclídeos de origem natural ficam na escória. A vantagem é a redução considerável no volume de resíduos. A fundição de sucata contaminada por NORM é uma prática regulamentada e deve estar em conformidade com os requisitos estabelecidos pelo órgão regulador do país.

Referências Bibliográficas

[1] IAEA *Safety Glossary Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection*, 2007 Edition. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2007.

[2] *Naturally Occurring Radioactive Material (NORM V) Proceedings of an International Symposium*, Seville, Spain, 19 - 22 March 2007.

[3] IAEA Safety Reports Series No. 49 *Assessing the Need for Radiation Protection Measures in Work Involving Minerals And Raw Materials. International Atomic Energy Agency,* Vienna, 2006.

[4] IAEA Safety Standards Series N^o. GSR Part 3 - *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources*: International Basic

Safety Standards. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2014.

[5] MAGALHÃES, M.H; SCHENATO, F., CRUZ, P. R. and. XAVIER, A.M. Safety and Radiation Protection in Mining and Milling Facilities. *International Nuclear Atlantic Conference* - INAC 2011. Belo Horizonte, MG, Brazil, October, 2011.

[6] Norma CNEN-NN-4.01 "*Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Instalações Mínero-Industriais*". Resolução 028/04. Publicada no DOU, em 26.05.2005.

[7] SCHENATO, F., AGUIAR L. A., LEAL M. A. and RUPERTI JR., N. Deposição de NORM Gerado Pelas Indústrias de Petróleo e Gás no Brasil. *IX Latin American IRPA Regional Congress on Radiation Protection and Safety* - IRPA 2013. Rio de Janeiro, RJ, Brazil, Abril de 2013.

[8] IAEA Management of NORM resources, IAE- TECDOC 1712, *International Atomic Energy Agency*, Vienna, 2013.

[9] Norma CNEN-NN-3.01 *"Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica"*. Janeiro de 2005.

[10] Posição Regulatória CNEN-PR-3.01/001 *"Critérios de Exclusão, Isenção e Dispensa de Requisitos de Proteção Radiológica"*. Novembro de 2005.

[11] IAEA Safety Standards Series Nº. 115 - *International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. International Atomic Energy Agency*, Vienna, 1996.

[12] Norma CNEN-NN-8.01 *"Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio nível de radiação"*. Abril 2014 – Resolução CNEN 167/14.

[13] IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.7. *Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance*. IAEA, Vienna, 2004.

[14] LEI FEDERAL nº 4.118 de 1962. Dispõe sobre a política nacional de energia nuclear, cria a Comissão Nacional de Energia Nuclear, e dá outras providências.

[15] LEI FEDERAL n° 6189 de 1974. Altera a Lei nº 4.118, de 27 de agosto de 1962 e dá outras providências.

[16] LEI FEDERAL n° 7781 de 1989. Dá nova redação aos artigos 2º, 10 e 19 da Lei nº 6.189, de 16 de dezembro de 1974, e dá outras providências.

[17] LEI FEDERAL n°10.308 de 2001. Dispõe sobre a seleção de locais, a construção, o licenciamento, a operação, a fiscalização, os custos, a indenização, a responsabilidade civil e as garantias referentes aos depósitos de rejeitos radioativos, e dá outras providências.

[18] Norma CNEN-NN-8.02 *"Licenciamento de depósitos de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio nível de radiação".* Abril 2014 – Resolução CNEN 167/14.

[19] Norma CNEN-NN-6.09 *"Critérios de aceitação para deposição de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio nível de radiação"*. Setembro de 2002.

[20] AIEA Classification of Radioactive Waste**.** General Safety Guide Nº GSG-1. Vienna, 2009.

[21] SMITH, K.P. *An Overview of Naturally Occuring Radioactive Materials (NORM) in Petroleum Industry*. ANL/EISA-7, Argonne, Illinois, Argonne National Laboratory (1992).

[22] SMITH, K.P., WILLIAMS, G.P; BLUNT, D.L. AND ARNISHET, J.J. *Radiological Dose Assessment of NORM Disposal in Class II Injection Wells.* ANL/EA CR, Argonne, Illinois, Argonne National Laboratory, 1997.

[23] VEIL, J.A., K.P. SMITH, D. TOMASKO, D. ELCOCK, D.L. BLUNT and G.P. W**.** *Disposal of NORM-Contaminated Oil Field Wastes in Salt Caverns* prepared for U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, Argonne National Laboratory, Argonne, IL, August, 1998.

[24] IAEA Safety Reports Series n° 40. *Radiation Protection and Management of Radioactive Waste in the Oil and Gas Industry*. International Atomic Energy Agency, 2010.

[25] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE *Bulletin on Management of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in Oil*

and Gas Production, API Bulletin E2, Second Edition, April, 2006.

[26] Naturally Occurring Radioactive Material (Norm VII) *Proceedings of the Seventh International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material*. China, 22 - 26 April 2013.

[27] WELBERGEN, J., WIEGERS, R., VAN VELZEN, L.P.M., KOPS, J., *"Practical issues for dealing with NORM in the Netherlands"*, Naturally Occurring Radioactive Material (NORM VI) — Proceedings of an International Symposium, Marrakesh, Morocco, 22–26 March 2010, Proceedings Series, 345–354, IAEA, Vienna, 2011.

[28] IAEA Safety Standards Series No. SSG-32 *Protection of the Public Against Exposure Indoors Due to Radon and Other Natural Sources of Radiation*. Vienna. 2015.

[29] IAEA, *Radiation Protection and Management of NORM Residues in the Phosphate Industry, Safety Report Series*, No 78, IAEA, Vienna, 2013.

9

Gerência de NORM

Rócio G. dos Reis

1. Introdução

O gerenciamento da produção, deposição e liberação destas substâncias, resíduos, rejeitos e efluentes NORM nas indústrias convencionais é um desafio, uma vez que estas não estão preparadas para lidar com a questão da radioatividade e mesmo, muitas vezes, desconhecem que estão produzindo material que contêm elementos radioativos em concentrações elevadas. Estas indústrias, então, passam a ter que lidar com conceitos e legislações que são específicos da área nuclear e a ter que compatibilizá-los com conceitos e legislações aplicadas nas áreas dos poluentes convencionais.

A extensão do risco a que a população e o meio ambiente estão sujeitos não está bem estabelecida no arcabouço legal e no meio científico, não só porque a geração de NORM pode ocorrer em diferentes tipos de indústrias, como também os níveis de radionuclídeos liberados para o meio ambiente ou presentes nos produtos, equipamentos, resíduos e rejeitos são dependentes, entre outras variáveis, dos níveis de radionuclídeos presentes nas matérias-primas e do processo utilizado.

Conhecendo-se os riscos, é possível planejar a melhor forma de lidar com os mesmos, e assim, evitá-los ou minorar seus efeitos, e, dessa forma, ter os custos e a necessidade de retrabalho minimizado e os benefícios de segurança e para o ambiente maximizado.

Existe um esforço no sentido de mitigar os eventuais riscos causados pela radioatividade através do adequado gerenciamento das atividades das indústrias NORM, de modo a minimizar a geração de rejeitos e os impactos ambientais e, em consequência, a exposição que os membros do público e/ou os profissionais que trabalham nessas indústrias possam vir a sofrer.

2. NORM – riscos

As empresas que, rotineiramente, deparam-se com a questão NORM em suas operações industriais devem planejar um modo de lidar com os riscos inerentes ao público, aos trabalhadores e ao meio ambiente. Como o aparecimento da questão NORM em uma indústria convencional depende de variados fatores, é importante salientar a necessidade de divulgar essa possibilidade e agir de forma proativa para determinar a presença ou a ausência de NORM desde o início.

Como já informamos em alguns capítulos deste livro, existem atividades industriais com maior probabilidade de ocorrência do NORM. Então, os gestores dessas empresas devem estar atentos à questão NORM e com os riscos associados. E devem estar atentos não somente durante a operação da instalação como também durante a etapa pré-operacional. Os riscos antes da operação rotineira da instalação podem ser os seguintes exemplos: [2]

i. Amostragens de solo, águas e sedimentos.
ii. Perfurações, escavações, carregamentos e explosões.

iii. Lavagens, concentrações, cominuição e britagem de minérios.
iv. Deposição de rejeitos e resíduos, transporte e guarda de testemunhos.
v. Obras, construções, demolições e paisagismos.

Para a avaliação do risco na fase exploratória, é importante saber ou ter uma boa estimativa das concentrações de radionuclídeos no minério, o comportamento dos radionuclídeos presentes durante as operações e atividades da empresa, e assim, determinar as áreas e as rotas de maior probabilidade de exposição e/ou contaminação radiológica. Tem que se ter em mente que para alguns elementos químicos, a toxidez pode ser mais relevante em termos de detrimento.

As rotas de maior probabilidade de exposição radiológica, geralmente, são:

a. Inalação de poeira contendo radionuclídeos.
b. Radônio, significativo em ambientes fechados e túneis de minas.
c. Irradiação gama direta é importante quando ocorre durante longos períodos gastos próximo a depósitos com alta concentração de atividade de radionuclídeos.
d. Ingestão de radionuclídeos.

Uma vez que as indústrias NORM a serem investigadas foram identificadas, o próximo passo é determinar se existe a necessidade de regular ou não. Isso requer uma investigação para determinar se qualquer trabalhador ou membro do público é suscetível de receber uma dose efetiva anual, a partir de fontes naturais de radiação decorrentes da operação desta indústria em excesso do limite de dose de 1 mSv.

Com base em cenários genéricos e suposições muito conservadoras, é possível oferecer uma técnica simples para tria-

gem e categorizar as indústrias NORM relevantes, relacionando critérios dose de radiação para níveis de referência mensuráveis em termos de concentrações de atividade do material em diferentes etapas do processo industrial. [2]

Em termos de processos industriais, estas indústrias, geralmente, caem em uma das seguintes categorias:

- Mineração e cominuição do minério;
- Separação física do mineral processado;
- Processos de extração química úmida;
- Processos térmicos de extração, tratamento e combustão de minerais;
- Gestão de resíduos.

Além disso, e com base em informações recolhidas na literatura, os tipos de materiais manipulados e/ou produzidos por indústrias NORM que devam ser considerados a partir de um ponto de vista radiológico são:

- Matérias-primas;
- Resíduos;
- Escórias;
- Lamas e sedimentos;
- Precipitação de poeira;
- Produtos intermediários e produtos finais.

Os indivíduos são expostos à radiação de diferentes formas e estas são comumente referidas como vias de exposição. Vias de exposição relevantes que devem ser tidas em conta em estudos NORM são os seguintes:

- Exposição externa à radiação gama;
- Exposição interna através da inalação de poeira;
- Exposição interna através da ingestão;

- Contaminação da pele (a partir de material depositado diretamente sobre a pele).

Exposições ocupacionais ocorrem quando os trabalhadores entram em contato próximo e prolongado com materiais NORM ou inalam poeira gerada durante o processo. Isto pode ocorrer durante o processo industrial, mas também durante as operações de manutenção. As rotas mais comuns de exposição dos processos que envolvam radionuclídeos naturais tendem a ser radiação gama externa, por exemplo, a partir de grandes quantidades ou pilhas de material armazenado ou de resíduos depositados dentro de equipamentos do processo e também a inalação de poeira.

A inalação de radioatividade ressuspensa pode ocorrer quando alguém respira ar carregado de pó com partículas contendo NORM que foram ressuspensos no ar, por exemplo, quando o material é transportado, moído ou depositado em um aterro. As doses de inalação são, geralmente, estimados com base nas concentrações de poeira, taxas de respiração e concentrações de radionuclídeos na fração fina da poeira.

É pouco provável para os resíduos e rejeitos NORM serem ingeridos de forma direta, embora o pó depositado sobre a pele sempre pode ser ingerido inadvertidamente por trabalhadores ou por membros do público. No entanto, as boas práticas exigem que quando um processo industrial tem o potencial para produzir poeiras, os trabalhadores devem usar equipamentos de proteção individual para prevenir ou reduzir o risco de contaminação através desta via.

A contaminação da pele, geralmente, não é considerada relevante na avaliação de dose relacionada com NORM, porque, geralmente, são materiais de baixa atividade específica.

Exposições do público podem surgir a partir de produtos de um processo, a partir das descargas atmosféricas ou líquidas de efluentes, a partir da reutilização de subprodutos de ma-

teriais. As vias mais importantes de exposição à radiação do público são a exposicão gama direta, a inalação e a ingestão.

3. Metodologia de avaliação

Os dois aspectos importantes do impacto potencial de NORM na saúde humana e no ambiente são: [1]

- O aumento das concentrações dos radionuclídeos acima de seus níveis naturais nos produtos, subprodutos ou resíduos.
- O reforço da sua disponibilidade para a liberação na biosfera através de alterações físico-químicas ou devido ao método pelo qual os resíduos ou rejeitos são geridos.

Geralmente, as concentrações de atividade de radionuclídeos observados em minerais e matérias-primas são moderadas em comparação com os níveis de radiação de fundo encontrados em todos os tipos de rochas ou solos. Portanto, a necessidade de regulação é mais provável que ocorra a partir da mobilização de radionuclídeos durante a extração ou da transformação da matéria-prima, especialmente, se as concentrações são aumentadas ou, se as vias de exposição para os seres humanos são modificadas. Indústrias afetadas pela presença de NORM diferem consideravelmente no que diz respeito ao tipo de processo, o tipo de material que é processado, as condições de trabalho e os radionuclídeos envolvidos. Estes aspectos, entre outros, devem ser tomados em conta quando se avalia o potencial grau de exposição.

Quando da realização de avaliações de dose, é necessário tentar cobrir todas as situações de exposição para os indivíduos potencialmente expostos. Os cenários devem ter em conta os trabalhadores e os membros do público e tambem os hábitos,

as características e os tipos de materiais, como são manuseados, armazenados e descartados.

Para cada investigação sobre a possibilidade de ter NORM as seguintes etapas devem ser concluídas:

- Revisão da literatura disponível sobre a indústria específica para obter uma visão geral dos problemas potenciais;
- Entrar em contato com os funcionários e organizar reuniões para conhecer os processos e obter o máximo de informações operacionais;
- Definir a metodologia que descreve o objetivo do estudo e como isso será alcançado;
- Coletar informações mais precisas e técnicas sobre o processo, o número de trabalhadores envolvidos em atividades específicas, características dessas mesmas atividades (de ocupação, a duração, o uso de equipamento de proteção individual, etc.);
- Sempre que possível, organizar a coleta de amostras representativas e realizar medições no local;
- Analisar as amostras recolhidas no laboratório;
- Realizar os cálculos de dose e analisar os resultados, ou seja, comparar com os requisitos legais;
- E finalmente, as conclusões e recomendações.

4. Responsabilidades

É importante estabelecer responsabilidades sobre quem deve responder sobre o problema NORM, caso essa questão afete a empresa. O ideal é que o cargo de Supervisor de Radioproteção (SPR) ou que acumule as atribuições na empresa responda por esta questão.

O SPR ou seu equivalente na empresa deve possuir o treinamento, experiência e o certificado adequado obtido na

CNEN. Sua principal responsabilidade é cuidar para que o risco de alguém vir a ser exposta a radiação ionizante acima de determinados limites seja administrado de forma a minimizar essa possibilidade.

5. Plano para Gerenciar NORM

Onde NORM é um perigo potencial em uma instalação, um plano de gestão NORM deve ser desenvolvido e deve: [1]

- Alinhar com as metas e objetivos do Sistema de Segurança e Saúde da instalação;
- Ser estabelecido utilizando práticas e procedimentos de gestão de risco da instalação;
- Listar todas as atividades relevantes e processos na mina;
- Estar documentado e ser auditável.

Um plano de gestão NORM também pode precisar ser desenvolvido na fase de exploração quando:

i. Os minerais de destino estão em uma área de ocorrência NORM conhecida.
ii. Os minerais-alvo têm uma associação conhecida com NORM, como por exemplo, cobre, ouro, terras raras, areias monazíticas.

Uma cópia atualizada do plano de gestão NORM deve ser mantida no local e disponível para todos os interessados.

As finalidades do plano de gestão NORM podem incluir:

- Descrição do tipo de minerais NORM minerados e nível de radiação potencial.
- Como o plano de gestão NORM se encaixa dentro do Sistema de Segurança e Saude da instalação.

Escopo das atividades de mineração:

- Um breve resumo que sintetiza os principais processos realizados no local, incluindo a gestão de resíduos.
- Um fluxograma do processo e a lista dos equipamentos principais envolvidos.

Modalidades de organização da gestão NORM:

- Gráfico da estrutura de organização da empresa mostrando responsabilidades e competências para a gestão da radiação NORM.

Arranjos de força de trabalho:

- Número de trabalhadores e suas funções.
- Horas de trabalho e as horas de trabalho anuais prováveis (para estimar a dose).

Rotas e risco de exposição à radiação incluem:

- Fontes e magnitude do NORM.
- Possíveis modos de exposição, por exemplo, inalação, absorção e ingestão.
- Identificação de áreas de armazenamento ou de transferência para NORM.

Engenharia de controle da radiação:

- Uma lista dos controles de engenharia, para todas as rotas e áreas identificadas de exposição à radiacao, implementadas para reduzir a exposição a um nível aceitável.

Controle administrativo da radiação:

- Controles administrativos para redução do risco, e assim, limitar a exposição.
- Uma lista de instruções e procedimentos escritos de segurança no trabalho relacionadas com a gestão de radiação.

Programa de monitoramento da radiação:

- Detalhes do programa de monitoramento das radiações.
- Procedimentos escritos para o programa de monitoração, incluindo operação e manutenção do equipamento.
- Lista do equipamento de monitoração.

Avaliação da dose:

- Estimativa do nível de exposição das categorias de trabalhador por projeto e ano.
- Justificação científica adequada e suficiente para quaisquer modelos pressupostos ou dados utilizados no processo de estimação.
- Explicação de como os resultados do programa de monitoramento são usados na avaliação/medição das doses dos trabalhadores.

Os registros de monitoramento e relatórios:

- Resultados de exposição e qualquer resultado de monitoramento fixo por categoria trabalhador.
- Relatórios de acompanhamento.

- Procedimento para responder e investigar as variações inaceitáveis do nível de exposição esperada de um trabalhador e/ou a sua estimativa de dose.

Gestão de produto:

- Detalhes dos métodos de manuseio, armazenamento e transporte de produtos NORM.

Gestão dos resíduos e rejeitos:

- Detalhes da manipulação, armazenagem e métodos de disposição de resíduos e rejeitos NORM, incluindo resíduos e rejeitos que ficaram no local (ver capítulo anterior).

Plano de resposta a emergência:

- Explicação do impacto que o NORM pode ter sobre os procedimentos e capacidades de resposta a emergência da mina ou instalação.

Revisão e auditoria incluem:

- Procedimentos para a revisão periódica, de auditoria e melhoria contínua do plano de gestao NORM.
- O plano de gestão NORM devem ser revisados e auditados pelo operador da mina, para garantir que os riscos para as pessoas provenientes das operações estão em um nível aceitável.

Referências Bibliográficas

[1] Guideline for management of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in metalliferous mines, Mining and Quarrying Safety and Health Act 1999, Version 1.0, Department of Natural Resources and Mines, State of Queensland, July 2014.

[2] Department of Mines and Petroleum, 2010. Managing naturally occurring radioactive material (NORM) in mining and mineral processing - guideline. NORM - 2.1. Preparation of a radiation management plan - exploration: Resources Safety, Department of mines and Petroleum, Western Australia, 42pp. <www.dmp.wa.gov.au>

Anexo A

Equação para determinação da atividade específica de minérios e concentrados em equilíbrio secular

Vanderlei Vilaça de Moura
Agnaldo Kenji Fuzimo Martins
Cláubia Pereira Bezerra Lima

I – Introdução

O conhecimento da atividade específica das substâncias radioativas naturais ou concentradas de uma instalação NORM[4] é de extrema importância. É este dado que permite a classificação dos materiais definindo o que é isento e o que é radioativo; que vai ser usado para determinar a atividade, no caso de transporte de material radioativo; que vai classificar a instalação; dentre outros usos.

A atividade específica pode ser medida ou estimada. A primeira opção apresenta um custo alto devido à tecnologia envolvida e à necessidade da expedição da amostra para laboratórios especializados. Além disso, ela é demorada e pelo fato da heterogeneidade dos minérios e minerais, ela deveria ser medida em diversos lotes de cada material. A segunda opção é pouco precisa, pois ela é, em geral, baseada em uma medida de atividade específica realizada previamente em lotes de controle.

4 Naturally Occurring Radioactive Material.

Ou ainda, na contagem de emissões obtidas em um cintilador ou em um detector a gás – contagem que depende da geometria da medida, além de outros fatores, e está sujeita a diversos erros de leitura.

Uma alternativa às duas apresentadas é o uso do resultado da análise química por fluorescência de raios-X. Ela parte de uma técnica de análise usada para a obtenção de teores de óxidos em minérios e minerais. Assim, como o urânio e o tório também ocorrem na natureza na forma de óxidos, ela pode ser adaptada para a obtenção de seus teores. A partir daí, usando a definição, chega-se ao valor da atividade específica.

O uso da fluorescência de raios-X apresenta vantagens: ela encontra-se disponível em um grande número de mineradoras no próprio sítio; custo inferior às análises radiológicas; a rapidez em que a análise pode ser realizada; possibilidade de uso em diversos lotes, etc.

Deste modo, apresenta-se na sequência uma equação para a determinação da atividade específica em minérios e minerais em equilíbrio secular, partindo da análise química por fluorescência de raios-X.

II– Equação para obtenção da atividade específica de minérios e concentrados em equilíbrio secular a partir da análise por espectrometria de raios-X

Inicialmente, seja a definição de atividade [8]:

$$A = \lambda N = \left(\frac{\ln 2}{T_{1/2}}\right) . \left(\frac{N_A}{M} . m\right)$$

Equação 1

Onde l é a constante de decaimento; N o número de partículas radioativas; $T_{1/2}$ é a meia-vida do radionuclídeo; N_A é o

número de Avogadro; M é a massa atômica e m a massa do minério.

Dividindo-se os dois lados da equação pela massa m, obtém-se a atividade específica A_e.

$$A_e = \left(\frac{\ln 2}{T_{1/2}}\right) \cdot \left(\frac{N_A}{M}\right)$$

Equação 2

No caso das mineradoras NORM, o material radioativo das substâncias sólidas naturais ou concentradas são os radionuclídeos das séries do urânio e do tório naturais. Assim, podemos reescrever a equação 2 como:

$$A_e = \left(\frac{\ln 2}{T_{1/2_U}}\right) \cdot \left(\frac{N_A}{M_U}\right) + \left(\frac{\ln 2}{T_{1/2_Th}}\right) \cdot \left(\frac{N_A}{M_{Th}}\right)$$

Equação 3

Onde o índice U indica urânio e Th tório.

A análise química por fluorescência de raios-X fornece o resultado em percentuais de octóxido de triurânio (U_3O_8) e de dióxido de tório (ThO_2). Deste modo, a equação 3 deve conter um fator para cada um dos óxidos. Além disso, o oxigênio, por não ser radioativo, não pode ser contabilizado na atividade específica. Assim, são necessários mais dois fatores de correção para os óxidos. Então:

$$A_e = a_U \left(\frac{3m_U}{3m_U + 8m_O}\right) \cdot \left(\frac{\ln 2}{T_{1/2_U}}\right) \cdot \left(\frac{N_A}{M_U}\right) + a_{Th} \left(\frac{m_{Th}}{m_{Th} + 2m_O}\right) \cdot \left(\frac{\ln 2}{T_{1/2_Th}}\right) \cdot \left(\frac{N_A}{M_{Th}}\right)$$

Equação 4

Onde m_U, m_{Th} e m_O são as massas do urânio, do tório e do oxigênio, respectivamente; a_U e a_{Th} que são os teores medidos de óxidos de urânio e de tório, respectivamente.

II.1 – Considerações sobre os isótopos de urânio e de tório:

Existem três isótopos de urânio na natureza e seis de tório. A análise por fluorescência de raios-X não é capaz de distingui-los. Assim, para a determinação da atividade específica, deve-se considerar que:

i) O U-238 e o U-234 pertencem a uma mesma cadeia de decaimento, sendo o primeiro o pai da cadeia. Assim, no equilíbrio secular, a atividade de ambos será igual. O outro isótopo é o U-235 que é pai de outra cadeia de decaimento e possui abundância isotópica de 0,7204%. Já o U-238 tem abundância de 99,274% [1] [12]. Deste modo, justifica-se considerar que na análise obtenha-se como resultado o isótopo de maior ocorrência.

ii) Os isótopos de tório pertencem a três cadeias de decaimento diferentes. O Th-230 e o Th-234 pertencem a cadeia do U-238. O Th-232 é pai de uma cadeia de decaimento a qual pertence o Th-228. O Th-227 e o Th-231 pertencentes à cadeia do U-235. Destes seis isótopos, considera-se que o Th-232 tem abundância de 100% na natureza. Os demais apenas traços [1] [12]. Assim, também justifica-se que na análise obtenha-se como resultado o isótopo de maior ocorrência.

Com as observações i e ii, pode-se escrever a equação 4 como:

$$A_e = a_U \ln 2 . N_A \left(\frac{3m_U}{3m_U + 8m_O} \right) . \left[\frac{0{,}992742}{(T_{1/2_U-238}).(M_{U-238})} + \frac{0{,}007204}{(T_{1/2_U-235}).(M_{U-235})} \right] +$$

$$+ a_{Th} \ln 2 . N_A \left(\frac{m_{Th}}{m_{Th} + 2m_O} \right) . \left(\frac{1}{T_{1/2_Th-232} M_{Th-232}} \right)$$

Equação 5

Onde os índices U-238, U-235 e Th-232 referem-se aos isótopos de urânio e tório.

Conforme considerado inicialmente, estando o minério em equilíbrio secular, a atividade do pai da série de decaimento será igual à atividade dos filhos da série. Assim, para o U-238[5], a atividade será multiplicada por 14; já para o Th-232[6], a atividade será multiplicada por 10.

$$A_e = 14 . \left[a_U A_{e_U} \left(\frac{3m_U}{3m_U + 8m_O} \right) \right] + 10 . \left[a_{Th} A_{e_Th} \left(\frac{m_{Th}}{m_{Th} + 2m_O} \right) \right]$$

Equação 6

Onde A_{e_U} é a atividade do urânio e A_{e_Th} é a atividade do tório.

A equação 6 representa a atividade específica de uma amostra em função da análise química por fluorescência de raios-X para o caso de resultado em termos de percentual de óxidos. No caso, resultado em ppm (parte por milhão) também se pode usá-la, mas devem ser feitas adaptações.

5 O U-238 foi escolhido, porque é mais abundante que o U-235 e pai do U-234, conforme mencionado em i. A cadeia de decaimento do U-238 possui 14 radionuclídeos.

6 Na cadeia do Th-232, existem 11 radionuclídeos. Consideram-se 10, porque o Bi-212 pode decair para ou para o Tl-208 com 36% de probabilidade, ou para o Po-212 com 64% de probabilidade [5].

III – Aplicações e discussão

Para expressar as constantes da equação 6 em termos numéricos, sejam os dados da tabela 1 e a constante de Avogadro [3] com o valor de $6{,}0221 \times 10^{23}$g/mol:

Tabela 1 – Constantes da equação 6.

Isótopo	Massa (g/mol) [2]	Meia-vida (anos) [2]	Abundância isotópica (%) [1]
U-238	238,05079	4,47E+09	99,274
U-235	235,04393	7,04E+08	0,7204
Th-232	232,02806	1,41E+10	100
Oxigênio	15,99491	-	-

$$A_e = 1.54\text{x}105\ a_u + 3.43\text{x}10^4\ a_{Th}$$

Equação 7

A equação 7 fornece a atividade específica em função dos teores de octóxido de triurânio e de dióxido de tório. Ela pode ser utilizada para:

1 – Classificação de material como isento. Os materiais são considerados isentos quando não é necessário o cumprimento de requisitos de proteção radiológica no seu manuseio, processamento, uso, transporte, etc. No caso do Brasil, a isenção depende de alguns fatores como justificação da prática; risco e impacto radiológico irrelevantes, resultando em dose efetiva no público inferior a 10uSv/ano e

dose coletiva inferior a 1pessoa.Sv; práticas inerentemente seguras; atendimento ao limite de isenção em termos de atividade específica e a aprovação da CNEN [4].

Deste modo, a partir da análise química, pode-se utilizar a equação 7 para verificar se a atividade específica de uma amostra de rocha, por exemplo, enquadra-se no limite de isenção, que no caso do urânio e do tório de ocorrência natural é de 1Bq/g [4]. Posteriormente, deve-se considerar os outros requisitos da isenção em especial a aprovação da CNEN.

2 – Classificação e transporte de material radioativo. Para a obtenção de ligas, é necessário o processamento físico, químico e metalúrgico de minérios e concentrados. Assim, em muitos casos, é necessário o transporte do material NORM para usinas de beneficiamento ou metalúrgicas. Como se trata de material da Classe 7, é necessário o cumprimento de requisitos específicos.

O primeiro passo é classificar o material como radioativo ou isento dos requisitos de transporte de acordo com as orientações da CNEN [6] ou da IAEA [5]. Para tanto, parte-se da atividade específica. Se considerado radioativo, a equação 7 vai auxiliar na obtenção da atividade do material, que será usada na documentação de transporte (declaração do expedidor, ficha de monitoração de carga e veículo, rótulos de risco, etc.).

A equação 7 será, neste caso, de extrema utilidade, pois cada lote de concentrado terá uma atividade específica diferente e deve ser expedido rapidamente para abastecer as usinas de beneficiamento e metalúrgicas. Usando-a, será feita uma grande redução de custo e de tempo.

3 – Apoio na classificação de mineradoras NORM. No Brasil, as mineradoras NORM são classificadas a partir da atividade específica das substâncias radioativas sólidas naturais ou concentradas (A_e), de acordo com a CNEN em norma específica [7]. Na tabela 2, é apresentada esta classificação.

Assim pode-se, através da análise química por fluorescência de raios-X, determinar os teores dos óxidos de urânio e de tório para utilização da equação 7 e obter a atividade específica de minérios e minerais. Este dado pode auxiliar na classificação de uma mineradora NORM, com a vantagem de poder repetir o processo para diversos lotes de diversos materiais a baixo custo e grande rapidez.

Tabela 2 – Classificação das mineradoras NORM no Brasil [7]

Categoria	Critério
I	$A_e \geq 500Bq/g$
II	$10Bq/g \leq A_e \leq 500Bq/g$
III	$A_e < 10Bq/g$

Referências Bibliográficas

[1] INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY. **Atomic Weights Of The Elements: Review 2000 (IUPAC Technical Report).** Genebra, 2003.

[2] http://www.kayelaby.npl.co.uk/atomic_and_nuclear_physics/ acesso em 01/06/2016.

[3] INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY. **Glossary of Terms in Quantities and Units in Clinical Chemistry.** Genebra, 1996.

[4] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (Brasil). **Posição Regulatória 3.01/001:2011 Critérios de Exclusão, Isenção e Dispensa de Requisitos de Pro-teção Radiológica – Norma CNEN-NN 3.01 - Requisitos Básicos de Proteção Radiológica**. Rio de Janeiro, 2011.

[5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material 2012 Edition - Specific Safety Requirements No. SSR-6**. Vienna, 2012.

[6] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (Brasil). **Norma-NE CNEN-NN 5.01 Transporte de Material Radioativo**. Rio de Janeiro, 1988.

[7] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (Brasil). **Norma -NN CNEN-NN 4.01 Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Instalações Mínero-Industriais**. Rio de Janeiro, 2005.

[8] ARAMBURU, X. O. & BISBAL, J. J. **Radiaciones Ionizantes – Utilización y riesgos.** Barcelona, 1994, Edicions UPC.

[9] TURNER, J. E. **Atoms, Radiation, and Radiation Protection**. Weinheim, 2007, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.

[10] MARTIN, J. E. **Physics for Radiation Protection.** Weinheim, 2006, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.

[11] SHULTIS, J. K. & FAW, R. E. **Fundamentals of Nuclear Science and Engineering.** Nova Iorque, 2002, Marcel Dekker, Inc.

[12] http://www.nndc.bnl.gov/chart/ acesso em 20/06/2016.

10

Medidas Práticas

Paulo Roberto Rocha Ferreira

Equipamentos/Instrumentação Portáteis para Detectar Radiação

O risco radiológico encontrado nas atividades relacionadas com as indústrias NORM são originados pela presença dos radionuclídeos das séries naturais do urânio e do tório no bem mineral a ser explorado ou como o insumo utilizado para alimentar uma produção industrial.

Os principais radionuclídeos encontrados são o Ra-226, descendente do U-238 e o Ra-228, descendente do Th-232.

A preocupação com a exposição dos trabalhadores destas indústrias, bem como a degradação do meio ambiente devido aos resíduos de práticas de "indústrias NORM" resultam da falta de conhecimento que estas exposições existem e que os resíduos gerados contenham material radioativo.

A maneira pela qual os profissionais de segurança do trabalho, bem como os supervisores de proteção radiológica aprovados pela CNEN que atuam nestas indústrias possuem é através da avaliação radiológica do local de trabalho.

A avaliação radiológica consiste na realização de medições, utilizando instrumentos apropriados para detectar, identificar e quantificar dois tipos de exposição:

1. Externa e (Figura 1);
2. Interna.

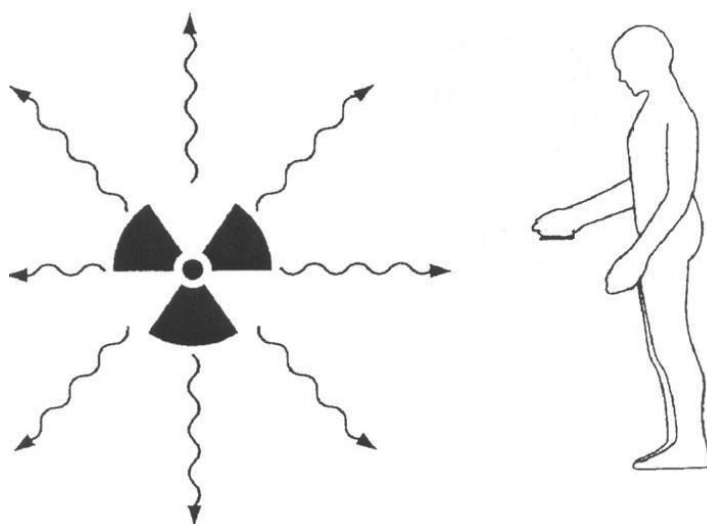



Figura 1: Fonte de radiação provocando uma exposição externa.

Segundo o Glossário Nuclear da CNEN [1], temos a seguinte padronização dos termos técnicos referentes à segurança nuclear e à proteção radiológica para o termo "exposição".

Exposição foi definida como sendo um ato ou condição de estar submetido à radiação ionizante (es-AR: Exposición; en-US: Exposure) e tendo os seguintes termos técnicos: exposição acidental, exposição crônica, exposição do público, exposição

externa, exposição interna, exposição médica, natural, normal, ocupacional e potencial.

Exposição externa é aquela exposição devido a fontes de radiação externas ao corpo humano (es-AR: Exposición externa; en-US: External exposure).(1)

Alguns equipamentos indicam a taxa de dose absorvida (Gray), estes são utilizados na medição de raios X, ϒ e radiação β. Também existem instrumentos específicos para medição de nêutrons.

Exposição Interna

Exposição interna é aquela exposição devido à presença de fonte de radiação dentro do corpo humano (es-AR: Exposición interna; en-US: Internal exposure), é aquela que é associada com materiais radioativos que são capazes de penetrar e interagir com o corpo humano. (1)

Neste sentido, necessitamos de equipamentos/instrumentação portáteis (campo) para medição de: Taxa de Dose (exposição externa), Contaminação de Superfícies e Contaminação do Ar (particulados e/ou aerossóis) e por gases ^{222}Rn da série radioativa do ^{238}U e o ^{220}Rn da série radioativa do ^{232}Th.

Critérios para seleção de equipamentos e/ou instrumentação para detectar radiação:

- Tipo de radiação a ser medida;
- Dose, taxa de dose ou contaminação de superfície;
- Energia de resposta do instrumento (para o qual foi calibrado);
- Respostas indesejadas e rotina de monitoração de alta sobrecarga de trabalho;
- Sensibilidade e alcance das medições necessárias;
- Velocidade de resposta do equipamento: lenta ou rápida, para ser utilizado em raios X diagnóstico, ele deverá possuir um tempo rápido de leitura;

- Escala analógica ou digital e facilidade de uso;
- Display iluminado e/ou saída de áudio;
- Resposta do equipamento nas condições ambientais: temperatura, umidade, radiofrequência, campos magnéticos etc.;
- Segurança relacionada a atmosferas potencialmente explosivas (extração e re-extração por solventes por solventes, áreas onde possam causar ignição em materiais inflamáveis (gases ou partículas de poeira)), equipamentos intrinsecamente seguros;
- Facilidade de descontaminação;
- Avaliação dos tipos de bateria e expectativa de vida útil;
- Tamanho, peso e transportável;
- Resistência, confiabilidade e utilidade;
- Custo inicial de aquisição e de manutenção.

Confiabilidade Metrológica - Fatores Importantes
- Interpretação adequada do certificado de calibração;
- Faixas em que o equipamento foi calibrado;
- Valor do erro de medição ou tendência do instrumento (corrige os erros);
- Incertezas de medição da calibração declarada no certificado (fundamental para avaliação da incerteza do resultado de medição).

Os monitores de área usuais:
- Câmaras de ionização;
- Cintiladores;
- Contadores Proporcionais;
- Geiger-Muller.

GRANDEZAS E UNIDADES PARA RADIAÇÃO IONIZANTE

Radioproteção

Na área de radioproteção, a grandeza fundamental, na qual os padrões nacionais de radiação de fótons são calibrados, é o kerma no ar. A partir do kerma no ar, podem-se determinar todas as grandezas operacionais de uso corrente na radioproteção, cujas definições e fatores de conversão encontram-se na literatura.

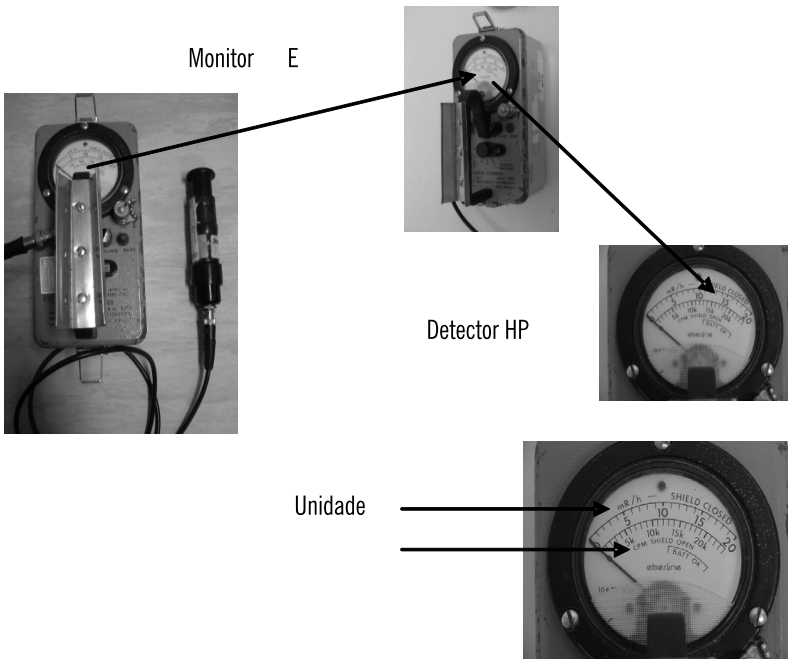
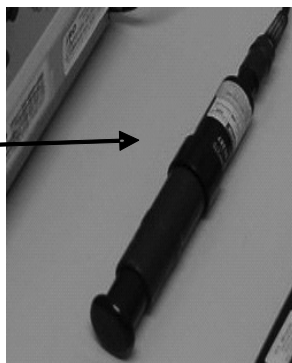
Apesar da grandeza exposição ser a mais usada e difundida na radioproteção, sua unidade, o Roentgen, deveria ter sido abandonada desde 1985 por recomendação da Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM). Nesta mesma ocasião, o CGPM sancionou que as unidades do domínio das radiações ionizantes fossem dimensionadas em unidades do Sistema Internacional (SI). Uma das soluções adotadas para radiação de fótons por alguns países foi a utilização da "exposição em sievert", que considera 1R = 0,01 Sv (1C/kg = 38,76 Sv). Na Alemanha, essa correlação foi definida por uma grandeza denominada equivalente de dose para fótons (photon dose equivalente), H_X.

Taxa de dose

As medições em proteção radiológica iniciam-se na faixa de 10^{-5}R e, para que as cargas e correntes produzidas nas câmaras de ionização utilizadas nesta aplicação, possam ser medidas pelos eletrômetros, elas possuem volumes da ordem de 200 cm^3. As escalas para medições de taxa de exposição (ou dose), vão de 1m R/h (0,153μSv/h) até 10 R/h (9,320 mSv/h) ou mais e, para medidas de exposição (ou dose), os instrumentos apresentam somente uma escala na faixa de 1 R [(2)].

A taxa de dose é a medição da energia absorvida da radiação penetrante, deve ser realizada por um instrumento apropriado e eficiente com leituras diretas de taxa de soe equivalente utilizando múltiplos e submúltiplos.

Equipamentos utilizados para medição de taxa de dose:

1- Analógicos:

2- Digital:

Sistema AT 6101C "Mochila – Backpack

O Sistema AT6101C (Figuras 2, 3, 4 e 5) é um sistema portátil de monitoração de radiação, é usado para a detecção de fontes radioativas em diversas atividades desde a avaliação radiológica de grandes áreas, como também eficiente para prevenção radiológica para ameaças terroristas, armazenamento ilegal, uso, transferência e tráfico de substâncias e materiais radioativos.

O AT6101C também pode ser usado para monitoração de radiação de áreas, rotas, terrenos isolados, instalações industriais e edifícios com função de referências GPS.

O sistema de monitoração é armazenado e transportado em uma mochila e equipado com uma sonda inteligente para espectrometria de radiação gama e sonda inteligente radiação de nêutrons.

Figura 2: Sistema de monito-ração AT6101C

Figura 3: Sistema de monitoração AT6101C

Figura 4: Resultados apresentados para a monitoração.

Figura 5: Dados gerados pelo Sistema AT6101C.

Sistema RadEye - PRD

O monitor de detecção para taxa de dose e dose RadEye - PRD (Figura 6) é um dispositivo de medição altamente sensível e robusto para detectar e localizar fontes de radiação e medir a taxa de dose de radiação gama. O RadEye - PRD incorpora um detector de cintilação altamente sensível NaI (TI) é equipado com um foto multiplicadora em miniatura, que permite a detecção de níveis muito baixos de radiação. Assim o RadEye - PRD

representa um equipamento de alta performance para profissionais que são responsáveis para detecção e localização de fontes de radiação.

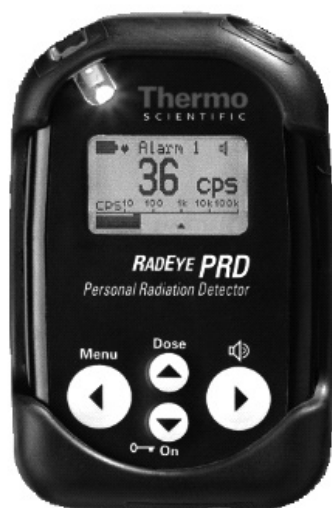



Figura 6: Sistema RadEye - PRD

Determinação da Contaminação de Superfícies

Equipamentos utilizados para a determinação da contaminação de superfícies baseiam-se em câmaras de ionização e são projetados para a medição de contaminações superficiais. Estes aparelhos trabalham medindo a corrente elétrica produzida pela interação da radiação e possuem uma “janela” feita de um material muito fino (normalmente, *mylar* aluminizado), cuja espessura é inferior ao alcance das partículas que se quer medir.

A medição da contaminação de superfícies é utilizada para detectar a presença de substâncias radioativas em superfícies (pisos, bancadas, equipamentos e etc.) facilmente acessíveis, esta determinação pode ser realizada de duas maneiras: Direta e Indireta.

Medição Direta

A determinação da contaminação de superfícies por medição direta é realizada através da utilização de sistemas de monitoração, utilizando detectores de contaminação de superfícies.

Monitor E520 com detectores HP 260 e AC3.7 (Figura 7) e Monitor E600 com detector SHP 260 (Figura 8).

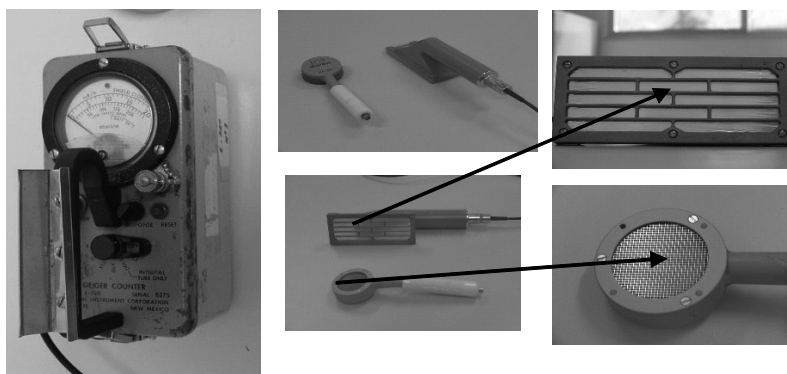



Figura 7: Sistema de monitoração E520 e detectores HP260 e AC3.7.

Figura 8: Monitor E600 e detector SHP 360.

As medições devem ser realizadas (Figura 9) com instrumentos calibrados e levando-se em conta a variação das eficiências de detecção em função dos contaminantes (radionuclídeos) encontrados.

Os instrumentos utilizados, geralmente, apresentam o resultado em contagem por minuto (COM) ou contagem por segundo (CPS).

Alguns instrumentos podem ser programados com a eficiência a ser utilizada de um dado radionuclídeos, obtendo-se a medida diretamente da contaminação (Bq/cm²).

Os resultados finais obtidos em CPM e CPS necessitam ser convertidos para Bq/cm².

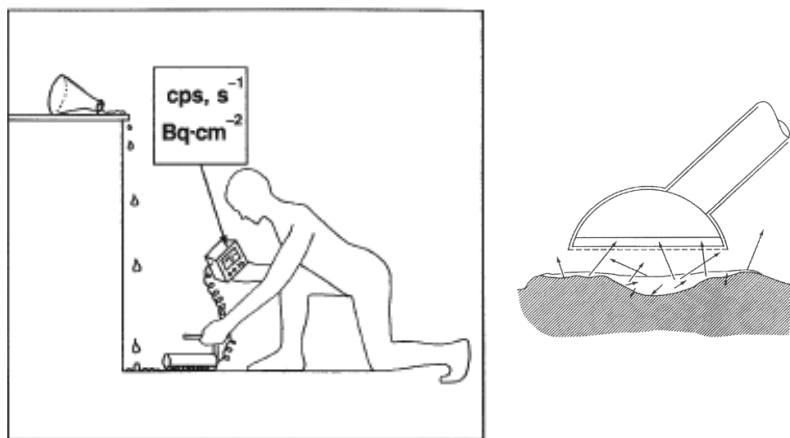



Figura 9 Determinação da contaminação de superfícies – Direta.

Medição indireta (esfregaços)

Medições indiretas podem ser obtidas através da coleta de amostras de esfregaços (Figuras 10, 11 e 12), estas amostras deverão ter sua avalição realizada através de sistemas compostos pelos seguintes equipamentos: contadores alfa e beta total e sendo seus resultados reportados também em Bq/cm^2(Figuras 13, 14, 15, 16 e 17).

Figura 10: Coleta de amostra.

Figura 11: Coleta de amostra.

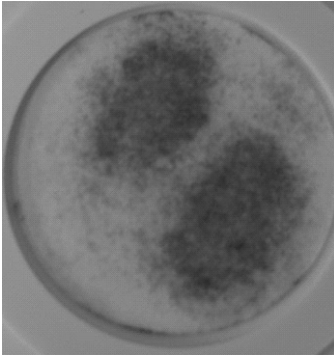



Figura 12: Amostra de Esfregaços.

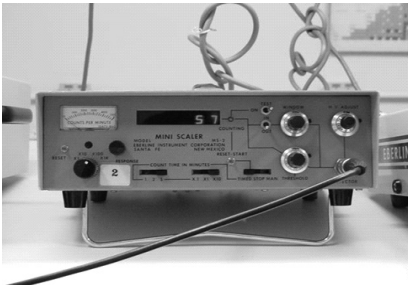



Figura 13: Sistema para contagem Alfa Total – Mini Scaler - MS 2 + Radiation Detec-tor – RD 14.

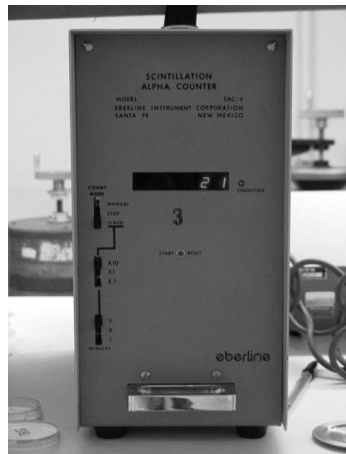



Figura 14: Scitilation Alpha Counter - SAC 4.

Figura 15: Beta Counter - BC4.

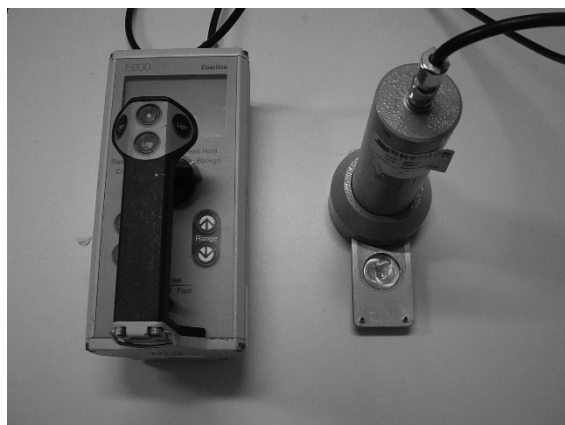



Figura 16: Monitor E600 acoplado com o detector Alpha SPA -1ª.

Figura 17: Detector Alpha SPA-1A.

Referências Bibliográficas

Glossário de Segurança Nuclear - CNEN, setembro de 2015.

Monitores de Radiação, Curso de atualização de Fiscais, Paulo Henrique Becker, 1998.

Work Place Monitoring, for Radiation and Contamination, Pratical Radiation Technical Manual, IAEA, 2004.

Grandezas e Unidades para Radiação Ionizante, Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes, LNMRI/IRD/CNEN, dezembro de 2002 e revisado em dezembro de 2011.

Anexo B

Ementa para Treinamento

Paulo Roberto Rocha Ferreira

Módulo 1

PROTEÇÃO RADIOLÓGICA OCUPACIONAL: CONCEITOS BÁSICOS

1. EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL

2. PRÁTICAS E INTERVENÇÃO
    - 2.1 Exposições decorrentes de práticas (situações de exposição planejadas)
    - 2.2 Situações de intervenção
        - situações de exposição de emergência
        - situações de exposição existente

3. APLICAÇÃO DO BSS A FONTES NATURAIS DE RADIAÇÃO
    - 3.1 NORM
    - 3.2 Radônio

4. REQUISITOS DE RADIOPROTEÇÃO
    - 4.1 Práticas
        - Justificação de práticas
        - O limite de dose

- Otimização de proteção e segurança
4.2 Intervenção

5. GRANDEZAS DOSIMÉTRICAS
5.1 Grandezas de radioproteção
5.2 Exposição externa
5.3 Exposição interna

6. LIMITES DE DOSE
6.1 Limites anuais
6.2 Aplicação de limites anuais
- Flexibilidade fornecida pelo cálculo da média
- Situações em que os limites de dose forem excedidos
- Situações especiais

7. NÍVEIS DE REFERÊNCIA
7.1 Níveis de referência em situações de exposição existentes
7.2 Nível de Intervenção
7.3 Nível de Investigação
7.4 Nível de Registro

8. RESPONSABILIDADES
8.1 Responsabilidades de registrantes, licenciados e empregadores
8.2 Responsabilidades dos trabalhadores
- Geral
- Proteção do embrião ou feto
8.3 A cooperação entre registrantes, licenciados e empregadores

9. DE PETRÓLEO E GÁS
9.1 Estrutura da indústria

9.2 Plataformas e métodos de perfuração:
- Plataforma;
- Métodos de construção e perfuração de poços;
- Finalização de poços;
- Planta Topside e equipamentos a jusante Topside plant and downstream equipment.

Módulo 2

MATERIAIS RADIOATIVOS DE OCORRÊNCIA NATURAL (NORM)

1. ASPECTOS GERAIS DOS NORM
2. ORIGEM E TIPOS DE NORM NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO E GÁS
   2.1 Mobilização da rocha reservatório e deposição
   2.2 Principais formas de apresentação
   2.3 Concentrações de radionuclídeos
3. PROTEÇÃO CONTRA AS RADIAÇÕES ASPECTOS DA NORMA
   3.1 Exposição externa
   3.2 Exposição interna
   3.3 Medidas práticas de radioproteção
   - Medidas contra a exposição externa
   - Medidas contra a exposição interna

4. CONTROLE DOS NORM
   4.1 Princípios
   4.2 Medidores de taxa de dose
   4.3 Monitores de contaminação de superfície
   4.4 Estratégias de monitoração
   - Monitoração de tarefas
   - Monitoração de rotina

- Vigilância especial
- Outras considerações

5. ASPECTOS ANALÍTICOS DE NORM
    5.1 Considerações gerais
    5.2 Incrustações e borras
    5.3 A água produzida ou de produção
        - Sem pré-concentração
        - Com pré-concentração

6. DESCONTAMINAÇÃO E GESTÃO DE RESÍDUOS DE NORM
    6.1 Descontaminação
        - A limpeza manual e aspiração
        - A remoção mecânica
        - Descalcificação química
        - Métodos abrasivos
        - Fusão
    6.2 Gestão de resíduos
        - Volumes e concentrações de atividade
        - Componentes não-radioativos
        - Abordagens reguladoras
        - Opções de escoamento
        - Problemas envolvidos na escolha de um método de deposição

Módulo 5

EMERGÊNCIAS E PLANOS DE CONTINGÊNCIA

1. INTRODUÇÃO

2. ACIDENTES COM FONTES SELADAS:
    2.1 Alta exposição e sobre-exposição a fontes de radiação

2.2 Fontes perdido ou extraviado
2.3 Recuperação de fontes de desconectado de um bem
2.4 O dano físico às fontes, contentores e outro equipamento
2.5 emergências do site, desastres naturais e conflitos.

3. EMERGÊNCIAS resultantes de acidentes com fontes de UNSEALED:
    3.1 Sobre-exposições externas
    3.2 Sobre-exposições internas
    3.3 Vazamentos e Derrames
    3.4 Material perdido

4. PLANOS DE EMERGÊNCIA/CONTINGÊNCIA ESTUDO DE CASO - Um poço de sondagem rompido

Módulo 6

PLANEJAMENTO E AS ATIVIDADES DE DESCOMISSIONAMNETO

1. INTRODUÇÃO

2. PLANEJAMENTO DO DESCLASSIFICAÇÃO

3. DESCLASSIFICAÇÃO SITE

4. SUMÁRIO

SIGLAS

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil
ANTAQ – Agência Nacional de Transporte Aquático
ANTT – Agência Nacional de Transporte Terrestre
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
BSS – Basic Safety Standards
DNPM – Departamento Nacional da Produção Mineral
EIA – Estudo de Impacto Ambiental
EPA – Environmental Protection Agency
FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations
CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear
CNNC – China National Nuclear Corp
IAEA – International Atomic Energy Agency
IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recurso Naturais Renováveis
ICRP – International Commission on Radiological Protection
IRPA – International Radiation Protection Association
ILO – Organização Internacional do trabalho
ISO – International Organization for Standardization
MTE – Ministério do Transporte
NASA – National Aeronautics and Space Administration
NORM – Naturally Occurring Radioactive Material
NRC – Nuclear Regulatory Commission
RAD – Radiation Assessment Detector

RAS – Relatório de Análise de Segurança
RASS – Relatório de Análise de Segurança Simplificado
RIMA – Relatório de Impacto Ambiental
TENORM– Technologically-Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material
TENR – Technologically Enhanced Natural Radiation
UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
WHO – World Health Organization

GLOSSÁRIO

Atividade – grandeza definida por A=dN/dt, onde dN é o valor esperado do número de transições nucleares espontâneas daquele estado de energia no intervalo de tempo dt. A unidade do sistema internacional é o recíproco do segundo (s-1), denominado becquerel (Bq).

Atividade Específica – atividade de um radionuclídeo por unidade de massa do mesmo. No caso de um material no qual o radionuclídeo está uniformemente distribuído, é a atividade por unidade de massa do material.

Deposição – colocação de rejeitos radioativos em local aprovado pelas Autoridades Competentes, sem a intenção de removê-los.

Dose Efetiva (ou simplesmente Dose) – média aritmética ponderada das doses equivalentes nos diversos órgãos. Os fatores de ponderação dos tecidos foram determinados de tal modo que a dose efetiva represente o mesmo detrimento de uma exposição uniforme de corpo inteiro. A unidade de dose efetiva é o joule por quilograma, denominada sievert (Sv). Os fatores de ponderação dos tecidos, wT, são: para osso, superfície óssea e pele, 0,01; para bexiga, mama, fígado, esôfago, tireóide e restante, 0,05; para medula óssea, cólon, pulmão e estômago, 0,12; e para gônadas, 0,20.

NORM – Naturally Occurring Radioactive Material – Material radioativo de ocorrência natural aumentado tecnologicamente ou não. É produzido durante vários diferentes processos e só considerado NORM devido a lei ou por decisão do órgão regulador.

Proteção Radiológica – conjunto de medidas que visam proteger o ser humano e seus descendentes contra possíveis danos causados pela radiação ionizante.

Radiação ionizante ou simplesmente Radiação – qualquer radiação eletromagnética ou de partículas que, ao interagir com a matéria, ioniza direta ou indiretamente seus átomos ou moléculas.

Rejeito Radioativo ou simplesmente Rejeito – é qualquer material resultante de atividades humanas que contenha radionuclídeos em quantidades superiores aos limites de isenção estabelecidos pela CNEN, para o qual a reutilização é imprópria ou não prevista.

Resíduo Radioativo ou simplesmente Resíduo – qualquer substância remanescente gerada em instalações mínero-industriais que contenha radionuclídeos das séries naturais do urânio e/ou tório, para a qual a reutilização é possível, levando em consideração aspectos de proteção radiológica estabelecidos pela CNEN.

Sievert – Equivalente de dose de radiação igual a um joule por quilograma, Sv.

Stakeholder – Grupo ou pessoa que tem interesse e poderá ser afetado por uma ação particular ou política.